



TRABAJO DE DIPLOMA

Actualización de prácticas de laboratorio con el Entrenador modular de Energía Solar Fotovoltaica "MINI-EESF".

Autor: Daniel Estrada Gainza

Moa, julio de 2024.



TRABAJO DE DIPLOMA

Actualización de prácticas
de laboratorio con el
Entrenador modular de
Energía Solar Fotovoltaica
"MINI-EESF".

Autor: Daniel Estrada Gainza

**Tutor: Ing. Victor Rodríguez
Durán**

Declaratoria de autoría.

Autor: Daniel Estrada Gainza

Tutor: Ing. Víctor Rodríguez Durán

Nosotros, autores del trabajo titulado "Prácticas de laboratorio con el Entrenador modular de Energía Solar Fotovoltaica MINI-EES" declaramos a la Universidad de Moa hacer uso de los resultados obtenidos en el mismo.

Y para que quede constancia firmamos la presente,

Daniel Estarda Gainza
Durán

Ing. Víctor Rodríguez

Pensamiento.

Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber.

Albert Einsten.

Agradecimientos.

Amigos verdaderos son los que te ayudan a levantarte cuando crees que no hay vuelta atrás. A todos ellos quiero expresar mi más sincera gratitud.

De manera especial quiero agradecer a mis amigos más cercanos Iván David, Dayron, Lester, Abad, Alejandro, Ricardo, Guadalupe, Sara, Yilena, Yasmani, Luis Daniel, Carlos Manuel por su incondicional apoyo durante la realización de esta tesis. Su comprensión y aliento ha sido fundamental para llevar a cabo este trabajo.

A mi familia por ser mi roca y mi fuente de energía gracias por creer en mí y estar ahí en cada paso del camino.

Quiero agradecer especialmente a mi tutor Víctor Rodríguez Durán que estuvo siempre presente en este proceso.

Dedicatoria.

Esta tesis se la dedico a mi madre Yenny Gainza Ávila y a mi padre Robin Estrada Sanregré y a todo aquel que se mantuvo apoyándome durante este proceso.

Resumen.

En el presente trabajo se realiza un diseño metodológico de la asignatura Energía Solar Fotovoltaica perteneciente a la disciplina de Sistemas Electroenergéticos, en la cual mediante el Entrenador modular de Energía Solar Fotovoltaica "MINI-EESF" se realizan diferentes laboratorios con el objetivo de que el estudiante logre habilidades y ponga en práctica conocimientos sobre la energía solar; se perfeccionan y actualizan las guías de laboratorios existentes ajustándolas al plan E y también se analizan las potencialidades del nuevo equipamiento de laboratorio "MINI-EESF.

Abstract.

In the present work a methodological design of the Photovoltaic Solar Energy subject belonging to the discipline of Electroenergetic Systems is carried out, in which through the modular Trainer of Photovoltaic Solar Energy "MINI-EESF" different laboratories are carried out with the objective that the student build skills and put solar energy knowledge into practice; The existing laboratory guides are perfected and updated, adjusting them to plan E and the potential of the new "MINI-EESF" laboratory equipment is also analyzed.

Índice:

Introducción general.....	1
Situación Problémica.....	2
Problema.....	2
Hipótesis.....	2
Objetivo General.	3
Objetivos Específicos.	3
Objeto de estudio.	3
Campo de acción.	3
Resultados Esperados.	3
Capítulo I: Generalidades sobre la asignatura Energía Solar Fotovoltaica. ...	4
1. Introducción del capítulo.....	4
1.1 Programa Analítico de Energía Solar Fotovoltaica (OPTATIVA).....	4
1.1 .1 Objetivos:	4
1.2 Fundamentación de la Asignatura.....	4
1.2.1. Sistema de conocimientos.....	4
1.2.2 Indicaciones metodológicas y de organización de la asignatura. ...	5
1.2.3. Fundamentación de la Disciplina Sistema Electro energéticos. .	5
1.2.4 Objetivos Generales de la Disciplina.	6
1.2.5 Sistema de Evaluaciones.	6
1.3 Relación de Temas de la asignatura Energía Solar Fotovoltaica.	6
1.3.1 Tema I: Recurso Solar.	6
1.3.1.1 Introducción a la Energía Solar Fotovoltaica.	6
1.3.1.2 Recurso solar como principio básico de la energía solar fotovoltaica.....	7
1.3.1.3 Radiación Solar.....	7
1.3.2 Tema II: Componentes de los sistemas fotovoltaicos.	7
1.3.2.1 Módulos fotovoltaicos comerciales a base de silicio.....	7
1.3.2.2 Las baterías y los controladores de carga.	8
1.3.2.3 Convertidores.	8
1.3.2.4 Cableado y protecciones de sistemas fotovoltaicos.....	8
1.3.3 Tema III: Dimensionado de sistemas fotovoltaicos.	9
1.3.3.1 Dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomos.	9
1.3.3.2 Dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomos. Aplicaciones prácticas.	9
1.3.3.3 Dimensionado de sistemas fotovoltaicos conectados a la red.	9

1.3.3.4 Dimensionado de sistemas fotovoltaicos conectados a la red y aplicaciones prácticas.....	9
1.4 Conocimientos esenciales a adquirir por el estudiante.	10
1.4.1 ¿Cómo funciona una célula fotovoltaica?	10
1.4.2 Estructura básica de una célula solar.	11
1.4.3 Componentes de la corriente dada por una célula solar fotovoltaica.	15
1.4.4 Relación de una célula solar y un diodo.....	15
1.4.5 Parámetros de una célula solar.....	18
1.4.6 Factores que afectan la característica I-V de la célula: Efecto de la iluminación, efecto de la temperatura.	20
1.4.7 Proceso de fabricación de las células monocristalinas.	22
1.4.8 Tipos de células fotovoltaicas.	26
1.4.9 Curva característica del módulo fotovoltaico.....	30
1.5 Conclusiones del capítulo.....	31
Capítulo II: Descripción del objeto de estudio (Entrenador modular de Energía Solar Fotovoltaica "MINI-EESF") y desarrollo de las prácticas.	32
2. Introducción de capítulo.....	32
2.1 Descripción del Equipo.....	32
2.1.1 Principales características.....	33
2.1.2 Módulo fotovoltaico.	33
2.1.3 Datos técnicos.....	34
2.1.4 Módulo de lámparas.....	34
2.1.5 Módulos que lo integran.	34
2.1.6 Dimensiones y Pesos.....	35
2.1.7 Elementos Opcionales.	35
2.2 Guía de laboratorios.	35
2.2.1 Indicaciones metodológicas y de organización.	35
2.2.2 Introducción al desarrollo de las guías de laboratorios.	36
2.2.3 Planificación, organización y control de las prácticas.	37
2.3 Desarrollo de las prácticas con el Entrenador modular de Energía Solar Fotovoltaica "MINI-EESF".	39
2.3.1 Práctica 1: Dependencia de la tensión de circuito abierto (V_{oc}) con los lúmenes.....	39
2.3.2 Práctica 2: Medida de la energía solar.....	40
2.3.3 Práctica 3: Medida de la tensión del panel solar en vacío.	42

2.3.4 Práctica 4: Determinación de la disposición de las células en un panel solar.	44
2.3.5 Práctica 5: Familiarización con los parámetros del regulador. Se realizará de forma teórica.	46
2.3.6 Práctica 6: Conexión de cargas a tensión continua de 12V.	46
2.3.7 Práctica 7: Conexión de cargas a tensión alterna de 220Vac.	48
2.3.8 Práctica 8: Carga de la batería. Se realizará de forma teórica.	50
2.4 Conclusiones del capítulo:.....	51
Conclusiones generales.	52
Recomendaciones.....	53
Bibliografía.	54
Anexos.	55

Introducción general.

La energía solar es la fuente principal de vida en la Tierra: dirige los cambios biofísicos, geofísicos y químicos que mantienen la vida en el planeta, los ciclos del oxígeno, del agua, del carbono y del clima. Ésta se puede aprovechar activamente captando la energía térmica (calor) o generando electricidad.

Fotovoltaica es la conversión directa de luz en electricidad a nivel atómico. Algunos materiales presentan una propiedad conocida como efecto fotoeléctrico que hace que absorban fotones de luz y emitan electrones. Cuando estos electrones libres son capturados, el resultado es una corriente eléctrica que puede ser utilizada como electricidad.

El primero en notar el efecto fotoeléctrico fue el físico francés Edmundo Becquerel, en 1839. Él encontró que ciertos materiales producían pequeñas cantidades de corriente eléctrica cuando eran expuestos a la luz solar. En 1905, Albert Einstein describió la naturaleza de la luz y el efecto fotoeléctrico, en el cual está basada la tecnología fotovoltaica. Por este trabajo, se le otorgó más tarde el premio Nobel de física. El primer módulo fotovoltaico fue construido en los Laboratorios Bell en 1954. Fue descrito como una batería solar y era más que nada una curiosidad, ya que resultaba demasiado costoso como para justificar su utilización a gran escala. En la década de los 60's, la industria espacial comenzó por primera vez a hacer uso de esta tecnología para proveer la energía eléctrica a bordo de las naves espaciales. A través de los programas espaciales, la tecnología avanzó, alcanzó un alto grado de fiabilidad y se redujo su costo. Durante la crisis de energía en la década de los 70's, la tecnología fotovoltaica empezó a ganar reconocimiento como una fuente de energía para diversas aplicaciones.

Las células fotovoltaicas convierten los fotones procedentes del Sol en corriente continua, cuyas características instantáneas (intensidad y tensión) varían con la irradiancia (intensidad energética), y con la temperatura ambiente. Mediante diferentes equipos electrónicos (reguladores de carga, inversores...) se puede suministrar en corriente continua con un cierto margen de calidad, no dependiendo exclusivamente del panel o/y se puede transformar en corriente alterna, con las mismas características que la

electricidad de la red convencional, para así poder suministrar a cargas o para ceder energía a la red eléctrica.

Se hace necesario la transmisión de estos conocimientos a los estudiantes, en la Universidad de Moa en la carrera de ingeniería eléctrica se ha implementado el estudio de diferentes asignaturas sobre las energías renovables para dotar a todos los estudiantes con los conocimientos necesarios de estas, entre estas asignaturas se encuentra "Energía Solar Fotovoltaica" ubicada en el primer periodo de 4to año de la carrera en la disciplina Sistemas Electro energéticos, se cuenta con un aula especializada para impartir esta asignatura y un Entrenador Modular de Energía Solar Fotovoltaica para realizar un grupo de laboratorios y así garantizar el sistema d habilidades que deben alcanzar los alumnos durante el curso que reciben.

Situación Problémica.

- Dentro del plan de estudio de la carrera de Ingeniería Eléctrica en la disciplina sistemas Electro-energéticos se encuentra la asignatura Electrificación Rural la cual cuenta con un equipo nombrado Entrenador modular de Energía Solar Fotovoltaica "MINI-EESF" que es un dispositivo a escala de laboratorio para el estudio de la energía solar el cual requiere ser utilizado para el desarrollo de clases prácticas las cuales contribuyan a una mejor enseñanza de esta asignatura.

Problema.

- La necesidad de modernizar el sistema de prácticas de laboratorios de la asignatura Energía Solar Fotovoltaica a partir de la asimilación y puesta en marcha del nuevo equipamiento de laboratorio: Entrenador modular de Energía Solar Fotovoltaica "MINI-EESF".

Hipótesis.

- La asimilación del Entrenador modular de Energía Solar Fotovoltaica "MINI-EESF" de laboratorio permitirá modernizar el sistema de prácticas de la asignatura Electrificación Rural y una mejor vinculación de la teoría con la práctica.

Objetivo General.

- Perfeccionar las prácticas de laboratorio las cuales al ser desarrolladas dotaran al estudiante con los conocimientos necesarios sobre la energía solar.

Objetivos Específicos.

- Asimilar el nuevo equipamiento de laboratorio Entrenador modular de Energía Solar Fotovoltaica "MINI-EESF".
- Diseñar las prácticas de laboratorio según las posibilidades del equipamiento y los requerimientos del programa de la disciplina.
- Confeccionar Guías metodológicas de las prácticas de laboratorios montadas.

Objeto de estudio.

- Entrenador modular de Energía Solar Fotovoltaica "MINI-EESF".

Campo de acción.

- Los laboratorios de la asignatura Energía Solar Fotovoltaica se realizarán en el aula especializada del Centro de Estudio De Energía y Tecnología Avanzada de Moa (CEETAM) de la Universidad de Moa.

Resultados Esperados.

- Puesta en funcionamiento del equipamiento de laboratorio.
- Montaje de las prácticas de laboratorio con el equipamiento actual.
- Guías metodológicas de las prácticas de laboratorios.

Capítulo I: Generalidades sobre la asignatura Energía Solar Fotovoltaica.

1. Introducción del capítulo.

En el presente capítulo abordaremos sobre las generalidades de la asignatura Energía Solar Fotovoltaica, se plasmará el programa analítico a utilizar a la hora de impartir esta asignatura a los estudiantes. También se realiza un resumen de los conocimientos esenciales a adquirí por el estudiante con el objetivo de una mejor asimilación de los contenidos por parte de los estudiantes.

1.1 Programa Analítico de Energía Solar Fotovoltaica (OPTATIVA).

Asignatura: Energía Solar Fotovoltaica.

Año: 4to año (1er período).

Plan: E.

Disciplina: Sistemas Electro energéticos.

Horas: 34.

1.1.1 Objetivos:

- Brindar a los estudiantes las generalidades del recurso solar como principio básico de la energía solar fotovoltaica.
- Definir la tipología de paneles fotovoltaicos y los componentes fundamentales de los mismos.
- Actualizar las tendencias en las infraestructuras civiles, eléctricas y de control; mínimas necesarias para la explotación de una instalación solar fotovoltaica.
- Determinar con claridad los costos asociados a la producción de energía eléctrica de origen solar.
- Ofrecer los efectos positivos y negativos que las instalaciones de aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica tienen sobre el medioambiente.

1.2 Fundamentación de la Asignatura.

1.2.1. Sistema de conocimientos.

Recurso solar como principio básico de la energía solar fotovoltaica. Fundamentos de la energía solar fotovoltaica. La energía solar fotovoltaica en Cuba. Coordenadas y movimientos de la Tierra. Coordenadas solares.

Orientación del generador fotovoltaico. Naturaleza de la radiación solar. Tipos de radiación solar. Radiación en superficies inclinadas. Cuantificación y medición de la radiación solar. Efecto fotovoltaico. Componentes de las celdas solares. Estructura del módulo fotovoltaico. Tipos de materiales y eficiencia de conversión fotovoltaica. Fichas técnicas del fabricante. Las baterías. Los controladores de carga. Funcionamiento de los convertidores CC/CA y CC/CC. Seguidor de potencia máxima. Cableado y protecciones. Sistemas fotovoltaicos autónomos y conectados a la red; dimensionado de las instalaciones.

1.2.2 Indicaciones metodológicas y de organización de la asignatura.

- Se recomienda impartir esta asignatura fundamentalmente en el aula especializada de Energías Renovables con que cuenta la universidad.
- Utilizar las TICs en cada uno de los temas y actividades que se desarrollen, donde el estudiante se pueda relacionar con imágenes y simulaciones de elementos reales de los sistemas solares fotovoltaicos.
- Utilizar softwares especializados en la simulación de la energía solar fotovoltaica como PV-sitp el cual se usa para el diseño de parques fotovoltaico y páginas web en las cuales el estudiante se podrá apoyar para investigar y buscar datos de la irradiancia solar como: www.renovable.ninja, www.meteonon.

1.2.3. Fundamentación de la Disciplina Sistema Electro energéticos.

Esta disciplina tiene que ver con todos los aspectos que tratan con la producción de energía eléctrica a partir de fuentes primarias de energía y los diferentes esquemas de generación en las redes eléctricas. Está muy ligada al estudio de los procesos de transformación de la energía y al conocimiento de las leyes de la Termodinámica y sus aplicaciones. Presenta muchos puntos de contacto con el perfil del Ingeniero Mecánico Termo energético, pero abarca solo lo que tiene que ver con la producción de energía eléctrica en específico y sus diferentes configuraciones.

En la actualidad, la producción de energía eléctrica en centrales térmicas que consumen combustible fósil es predominante y es necesario, por tanto, que el graduado conozca cómo se consigue la transformación de la energía en

este tipo de centrales y cuál es su composición típica y características más importantes.

Por otra parte, debido a la escasez y variabilidad de precios de estos combustibles, así como de los problemas medio ambientales que crea, en nuestro país el MINEM está profundamente comprometido con el cambio de la matriz energética a través de la introducción de otras fuentes primarias de energía sustentables y poco contaminantes como son la energía solar fotovoltaica, la energía eólica, la biomasa y otras. Es también grande el compromiso con el paso a esquemas de generación diferentes que aprovechan mejor las energías sustentables.

Es necesario por tanto que esta disciplina considere estos aspectos y lleve a los estudiantes los conocimientos necesarios para enfrentar su desarrollo en nuestro país. En este caso, se tratará cada fuente de energía renovable estudiada desde el punto de vista de la central de energía que la produce.

1.2.4 Objetivos Generales de la Disciplina.

Analizar, evaluar y adquirir los conceptos más importantes sobre la explotación y utilización de centrales de energía eléctrica tanto térmica como renovable a partir de los conocimientos básicos de las leyes de la Termodinámica y otras leyes de la Física.

1.2.5 Sistema de Evaluaciones.

Se evaluará a través de prácticas de laboratorios y preguntas de control en clases, con una evaluación final encaminada al diseño de un sistema fotovoltaico.

1.3 Relación de Temas de la asignatura Energía Solar Fotovoltaica.

La asignatura cuenta con tres temas:

1.3.1 Tema I: Recurso Solar.

Objetivo: Analizar el origen de la energía solar fotovoltaica, su potencial energético y sus formas de aprovechamiento.

1.3.1.1 Introducción a la Energía Solar Fotovoltaica.

Objetivo: Familiarizar a los estudiantes con las generalidades de la energía solar fotovoltaica.

Sumario:

1. Generalidades
2. Fundamentos de la energía solar fotovoltaica.
3. La energía solar fotovoltaica en Cuba.

1.3.1.2 Recurso solar como principio básico de la energía solar fotovoltaica.

Objetivo: Familiarizar a los estudiantes con el recurso solar como principio básico de la energía solar fotovoltaica.

Sumario:

1. Coordenadas y movimientos de la Tierra.
2. Coordenadas solares.
3. Orientación del generador fotovoltaico.

1.3.1.3 Radiación Solar.

Objetivo: Familiarizar a los estudiantes con las principales características de la radiación solar.

Sumario:

1. Naturaleza de la radiación solar.
2. Tipos de radiación solar.
3. Radiación en superficies inclinadas.
4. Cuantificación y medición de la radiación solar.

Tabla 1.1: Estadísticas de las actividades para el tema.

Tipo de Actividades	Cantidad	Horas	% del Tema	Observación
Conferencias	3	6	75%	Aula
Laboratorios	1	2	25%	Aula especializada FRE
Total	4	8	100%	

1.3.2 Tema II: Componentes de los sistemas fotovoltaicos.

Objetivo: Definir los componentes de los sistemas fotovoltaicos.

1.3.2.1 Módulos fotovoltaicos comerciales a base de silicio.

Objetivo: Familiarizar a los estudiantes con los módulos fotovoltaicos comerciales a base de silicio.

Sumario:

1. Efecto fotovoltaico.
2. Componentes de las celdas solares.
3. Estructura del módulo fotovoltaico.
4. Tipos de materiales y eficiencia de conversión fotovoltaica.
5. Ficha técnica del fabricante.

1.3.2.2 Las baterías y los controladores de carga.

Objetivo: Familiarizar a los estudiantes con las baterías y los controladores de carga.

Sumario:

- Las baterías.
- Los controladores de carga.

1.3.2.3 Convertidores.

Objetivo: Familiarizar a los estudiantes con los convertidores.

Sumario:

- Funcionamiento del convertidor CC/CC.
- Funcionamiento del convertidor CC/CA.
- Seguidor de potencia máxima.

1.3.2.4 Cableado y protecciones de sistemas fotovoltaicos.

Objetivo: Familiarizar a los estudiantes con el cableado y protecciones de sistemas fotovoltaicos.

Sumario:

- Introducción al cableado y a las protecciones.
- Cables.
- Protecciones.

Tabla 1.2: Estadísticas de las actividades para el tema:

Tipo de Actividades	Cantidad	Horas	% del Tema	Observación
Conferencias	4	8	57.14%	Aula
Laboratorios	3	6	42.86%	Aula especializada FRE
Total	7	14	100%	

1.3.3 Tema III: Dimensionado de sistemas fotovoltaicos.

Objetivo: Determinar la estructura de sistemas fotovoltaicos autónomos y conectados a la red.

1.3.3.1 Dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomos.

Objetivo: Definir el dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomos.

Sumario:

- Sistemas fotovoltaicos autónomos.
- Dimensionado de una instalación fotovoltaica autónoma.

1.3.3.2 Dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomos.

Aplicaciones prácticas.

Objetivo: Definir en casos de estudios variables el dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomos.

Sumario:

Aplicaciones prácticas de instalaciones fotovoltaicas autónomas. Casos de estudio.

1.3.3.3 Dimensionado de sistemas fotovoltaicos conectados a la red.

Objetivo: Definir el dimensionado de sistemas fotovoltaicos conectados a la red.

Sumario:

Introducción a los sistemas fotovoltaicos conectados a la red.

Dimensionado de una instalación fotovoltaica conectada a la red.

1.3.3.4 Dimensionado de sistemas fotovoltaicos conectados a la red y aplicaciones prácticas.

Objetivo: Definir en casos de estudios variables el dimensionado de sistemas fotovoltaicos conectados a la red.

Sumario:

Aplicaciones prácticas de instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red. Casos de estudios.

Tabla1.2: Estadísticas de las actividades para el tema:

Tipo de Actividades	Cantidad	Horas	% del Tema	Observación
Conferencias	4	8	66.66%	Aula
Clases Prácticas	2	4	33.34%	Aula especializada FRE
Total	6	12	100%	

Bibliografía.

- EDIBON (2022). "Entrenadores Modulares de Energía Solar Fotovoltaica (MINI-EESF). Equipamiento Didáctico para la Educación Técnica e Ingeniería." pág. 9.
- Perpiñán Lamigueiro, O. (2018). Energía Solar Fotovoltaica. pág. 186.
- Stolik Novygrad, D. (2019). Energía fotovoltaica para Cuba. Cuba. pág. 555.
- UNESCO (2011). "Cátedra UNESCO de Sostenibilidad de la UPC y Fundación Politécnica de Catalunya. Master en Energía para el Desarrollo Sostenible. Módulo 3 - Evaluación de Recursos Energéticos Renovables." pág. 148.
- UNESCO (2011). "Cátedra UNESCO de Sostenibilidad de la UPC y Fundación Politécnica de Catalunya. Master en Energía para el Desarrollo Sostenible. Módulo 5 - Energía Solar Fotovoltaica." pág. 215.

1.4 Conocimientos esenciales a adquirir por el estudiante.

1.4.1 ¿Cómo funciona una célula fotovoltaica?

Por medio de las células fotovoltaicas el equipo MINI-EESF convierte directamente los fotones procedentes del sol en energía eléctrica. Dicha conversión se debe principalmente a la propiedad de los semiconductores de liberación de electrones como consecuencia de la absorción de un fotón de luz de suficiente energía.

En los semiconductores la energía que liga a los electrones de valencia con su núcleo es similar a la energía de los fotones que constituyen la luz solar. Al incidir ésta sobre el semiconductor (normalmente silicio), los fotones con energía suficiente ($E > E_g$) suministran dicha energía para que los electrones de valencia rompan sus enlaces y queden libres para circular por el semiconductor.

Al lugar que deja la ausencia del electrón liberado se le llama hueco y dispone de carga positiva (igual a la que tenía el electrón pero de signo contrario), se dice por tanto que se ha formado un par electrón - hueco (eh). Estos huecos también se “desplazan” pudiendo el electrón liberado caer en un hueco próximo volviendo a quedar los enlaces del silicio perfectamente reconstituido. En este proceso, el sistema disipa el exceso de energía en forma de calor. Este proceso recibe el nombre de recombinación.

La recombinación del electrón en el hueco es difícil aunque se encuentren simultáneamente en la misma posición, ya que no es probable que reúnan las condiciones necesarias como para que se cumpla la conservación del impulso; es mucho más común que el proceso de recombinación tenga lugar asociado a un defecto del cristal, ya que estos destruyen la simetría del mismo y liberan de la necesidad de conservación del impulso. El defecto puede capturar bien el electrón, bien el hueco.

Estos electrones libres y los huecos creados en los puntos donde hay luz tienden a difundirse hacia las zonas oscuras, con lo cual pierden su actividad. Sin embargo, al moverse ambas partículas en el mismo sentido, no producen corriente eléctrica, y antes o después se recombinan restableciendo el enlace roto.

No obstante, si en algún lugar próximo a la región donde estas parejas de electrones y huecos han sido creadas se formará un campo eléctrico en el interior del semiconductor, este campo separaría a los electrones de los huecos, haciendo que cada uno circule en dirección opuesta y, por consiguiente, dando lugar a una corriente eléctrica en el sentido del citado campo eléctrico.

Existen varias formas de crear un campo eléctrico de este tipo en el interior del semiconductor, pero todas ellas están basadas en el concepto de potencial de contacto y la afinidad que diferentes sólidos tienen por los electrones.

1.4.2 Estructura básica de una célula solar.

En las células solares convencionales el campo eléctrico mencionado en el apartado anterior se consigue mediante la unión de dos regiones de un cristal

de silicio, que han sido tratadas químicamente mediante la adición por difusión de impurezas, de tal manera que la red cristalina del semiconductor no se interrumpa al pasar de una región a otra.

Una de las dos regiones, la denominada “n”, los electrones son muy abundantes en comparación con los huecos, esto se debe a que al semiconductor se le han adicionado de manera controlada impurezas donadoras (como puede ser el fósforo); a la región contigua, denominada región “p”, le sucede justamente lo contrario, siendo dopada con impurezas aceptadoras (como puede ser el Boro).

En esta unión p-n existe, por tanto, un gradiente muy alto de ambos tipos de portadores, que hace que los electrones tiendan a abandonar la región en la que son mayoritarios, mediante el desplazamiento de cargas de mayor a menor concentración. Al ocurrir esto dejan, en la zona próxima a la unión a las cargas fijas, donadores cargados positivamente en la zona “n” y aceptores cargados negativamente en la zona “p” como se muestra en la figura 1.4.1, sin la neutralización que daban las cargas móviles, electrones y huecos respectivamente.

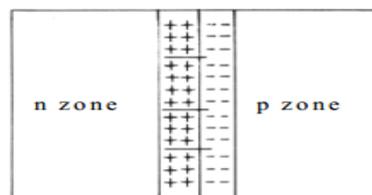


Figura 1.4.1 Unión p-n

Esto produce a ambos lados de la unión un campo eléctrico dirigido de la zona “n” a la “p”. Desde el momento en que aparece un campo eléctrico, aparece una diferencia de potencial a ambos lados de la pared qV que hace más baja la energía de los electrones en la zona “n”. Es decir, todos los niveles de energía de la zona “p” quedan incrementados qV .

Diagrama de bandas de una unión p- n:

En un conductor intrínseco (no dopado) el número de electrones es igual al de huecos, por lo tanto, el nivel de Fermi, definido como el nivel de energía cuya probabilidad de ocupación es un medio, se encuentra con

independencia de la temperatura en la zona media del semiconductor como se ve en la figura 1.4.2.

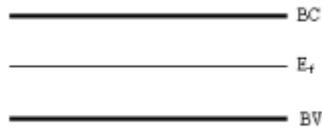


Figura 1.4.2 Diagrama de bandas I

En un semiconductor dopado con impurezas donadoras (tipo “n”), las impurezas donadoras generan un nivel de energía que mantiene las cargas fijas ante un campo eléctrico (a excepción de que éste sea muy grande) próximo al fondo de la banda de conducción, de tal manera que cuando $N_D \gg N_i$ el nivel de Fermi se sitúa en medio de los dos subniveles ocupados por los dos tipos de portadores de las impurezas donadoras figura 1.4.3.



Figura 1.4.3 Diagrama de bandas II

En un semiconductor dopado con impurezas aceptoras (tipo “p”) de manera que $N_D \gg N_i$ ocurre justamente lo contrario, éstas impurezas generan un nivel de energía próximo a la banda de valencia, colocándose el nivel de Fermi en medio de los dos subniveles ocupados por los dos tipos de portadores de impurezas aceptoras figura 1.4.4.

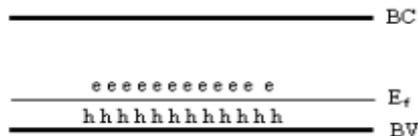


Figura 1.4.4 Diagrama de bandas III

Ahora imaginemos una hipotética unión de las dos regiones (tipo “n” y “p”). Por separado, los niveles de Fermi de cada semiconductor son diferentes,

mientras que una vez unidos el nivel de Fermi debe de ser constante en todo el cristal.

En la unión los portadores mayoritarios de la región "n" (electrones) se trasladan a la banda de conducción de la región donde son minoritarios. Allí se recombinan con los huecos ocupando las posiciones fijas de éstos. De esta manera en la zona cercana a la unión se genera un campo eléctrico y en contrapartida estos electrones situados en la otra región donde son minoritarios ejercen una fuerza contraria al movimiento natural de los electrones de tal manera que se va generando una diferencia de potencial.

Por lo tanto, cuando el fotón con energía $h\nu$ incide sobre el semiconductor tipo n rompe el enlace y genera un par electrón – hueco. Una vez logrado esto hay que impedir que este enlace se restablezca por el proceso de recombinación. Por lo cual lo que se suele hacer es aumentar el nivel de impurezas aceptoras en el semiconductor tipo p, para que el campo se desplace hacia el tipo n, produciendo que éste este prácticamente dentro del campo eléctrico.

Por lo tanto cuando el fotón incide sobre el material semiconductor con energía suficiente rompe el enlace y genera un par electrón – hueco (eh). Una vez logrado esto hay que impedir que este enlace se restablezca por el proceso de recombinación. Aquí es donde intervienen la unión p–n, con un alto campo eléctrico, desplazado hacia la zona "n" esto se aprecia en la figura 1.4.5, separa los pares electrón – hueco (eh) generados, y enviando los portadores minoritarios hacia la región donde son mayoritarios. Una vez allí, ya no hay que temer por la recombinación, pues ésta está controlada por los minoritarios. Entonces el hueco en la zona "p" provoca la extracción de un electrón desde el metal que constituye el contacto; los electrones, cargas negativas, dirigidos hacia el contacto del lado n son inyectados en el metal. Esto hace posible el mantenimiento de una corriente eléctrica por el circuito exterior y en definitiva el funcionamiento de la célula como generador fotovoltaico.

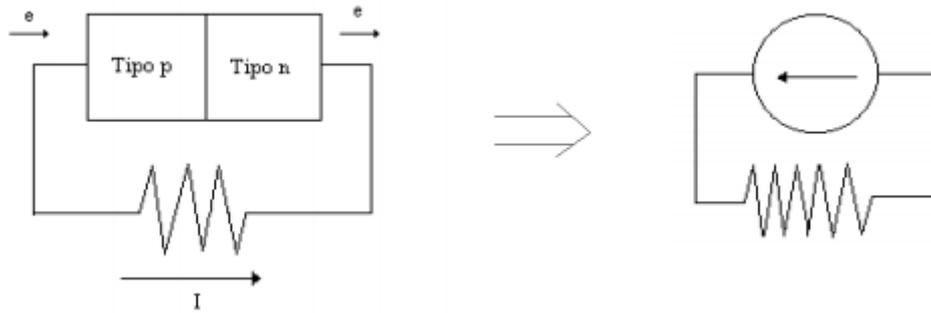


Figura 1.4.5 Representación eléctrica de la unión N-P

1.4.3 Componentes de la corriente dada por una célula solar fotovoltaica.

La corriente dada a la carga por una célula solar fotovoltaica es el resultado de dos componentes opuestas internas de corriente representadas en la figura 1.4.6. Esas componentes son:

- Corriente de iluminación (I_L): dada por los portadores la cual produce iluminación.
- Corriente de oscuridad (I_0): dada por la recombinación de los portadores la cual produce el voltaje necesario para dar energía a la carga.

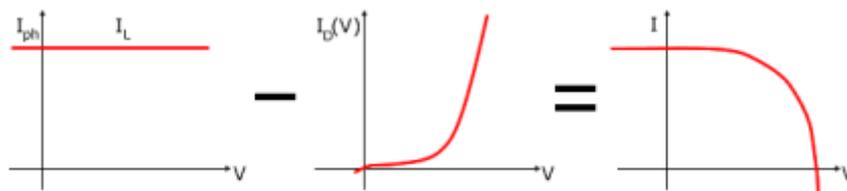


Figura1.4.6 Componentes de la corriente

1.4.4 Relación de una célula solar y un diodo.

La estructura de una célula solar es, en definitiva, la estructura de un diodo. Como tal, su característica $I - V$ medida en oscuridad (sin iluminación) corresponde a la característica exponencial de un diodo expresado por la ecuación 1.1:

$$I \approx I_0(T) \left(\exp \frac{eV}{mkT} - 1 \right) \quad (1.1)$$

Cuya representación gráfica se muestra en la figura 1.4.7.

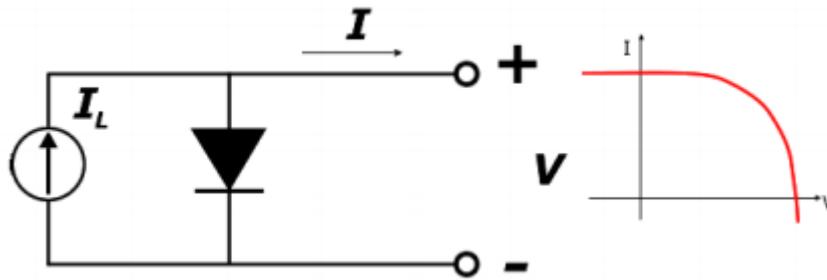


Figura 1.4.7 Curva característica del diodo

Donde m es el denominado factor de idealidad del diodo, un valor comprendido típicamente entre 1 y 2. Esta corriente no es otra cosa que la recombinación inducida dentro del dispositivo por efecto de la tensión V . Se debe observar, que la recombinación depende exponencialmente de la tensión. El parámetro I_0 (T) recibe el nombre de corriente inversa de saturación del diodo y es un parámetro fuertemente dependiente de la temperatura quedando así la siguiente ecuación 1.2:

$$I_0(T) \propto \exp \frac{-E_g}{kT} \quad (1.2)$$

Ser consciente de esta dependencia con la temperatura es importante para comprender los problemas de las células solares relacionados con su calentamiento. Así, observe que, a tensión, si la temperatura aumenta, la corriente I también aumenta. La caracterización de la curva de oscuridad a través del valor del parámetro I_0 (T) también proporciona información sobre el grado de recombinación en la célula: células aparentemente idénticas son más recombinantes cuanto mayor sea el valor de I_0 (T).

Las células solares obedecen, con buen grado de aproximación, el denominado principio de superposición. Esto quiere decir que si se quiere obtener la corriente que pasa por una célula iluminada y sometida a una tensión V por efecto de la carga, se puede hacer sumando la corriente que pasaría por la célula si estuviese sometida a la tensión V . De esta forma queda de la siguiente manera en la ecuación 1.3:

$$I = I_0(T) \left(\exp \frac{eV}{mkT} - 1 \right) - I_L \quad (1.3)$$

A tensiones bajas $I \approx I_L \equiv I_{sc}$. A medida que la tensión crece, el segundo término de la ecuación anterior (que no hay que olvidar que describe la recombinación en la célula) va aumentando y la corriente disminuyendo. Dado el carácter exponencial de este término la disminución de hace patente de una forma brusca. La tensión de circuito abierto viene dada por la ecuación 1.4:

$$V_{oc} \approx \frac{mkT}{e} \ln\left(\frac{I_L}{I_0(T)}\right) \quad (1.4)$$

La característica ideal de la célula solar se ve alterada por la presencia de dos factores, la resistencia serie y la resistencia paralela de la célula que afectan, sobre todo, a la eficiencia de la célula.

La resistencia serie, R_s , de la célula es una resistencia interna de la célula y se debe a la malla de metalización, a la resistencia de los contactos y a la resistencia del propio semiconductor con el que se ha fabricado. Anteriormente ya se mencionó el compromiso entre el factor de recubrimiento de la célula y este parámetro en el sentido que cuando el factor de recubrimiento tiende a cero (la malla de metalización deja pasar más luz) la resistencia serie tiende a incrementarse hacia el infinito.

La resistencia paralela, R_p , tiene su origen en imperfecciones en la calidad de la unión $p - n$ que constituye la célula y es responsable de permitir la existencia de fugas de corriente.

Estos dos factores se pueden tener en cuenta en el modelo de la célula solar de forma que su ecuación característica viene ahora determinada por la ecuación 1.5:

$$I = I_0(T) \left(\exp \frac{eV + R_s I}{mkT} - 1 \right) - I_L - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (1.5)$$

El circuito equivalente de esta ecuación está representado en la figura 1.4.8

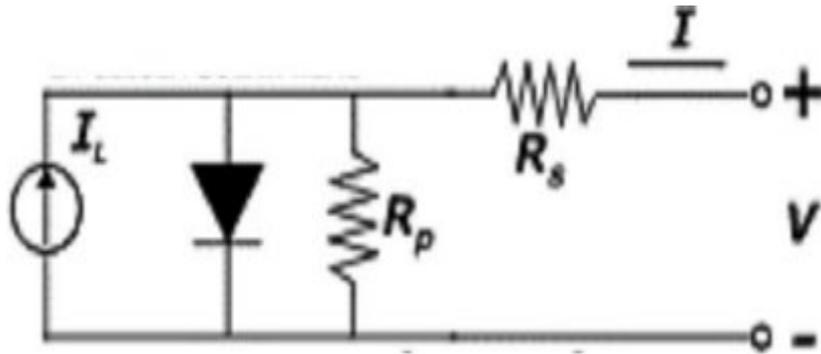


Figura 1.4.8: Modelo circuital de una célula solar

La influencia cualitativa de estos parámetros en la forma de la característica de la célula se ha ilustrado en la figura 1.4.9:

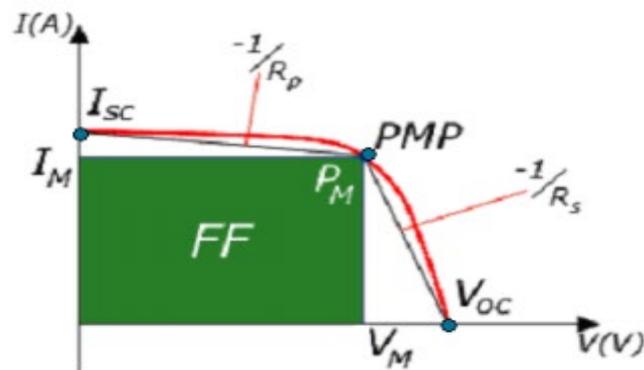


Figura 1.4.1: Efectos en la curva característica de una célula solar derivados de la presencia de la resistencia serie paralelo.

1.4.5 Parámetros de una célula solar.

La curva Intensidad - Tensión ($I - V$) que define el comportamiento de una célula fotovoltaica está representada en la figura 1.4.10.

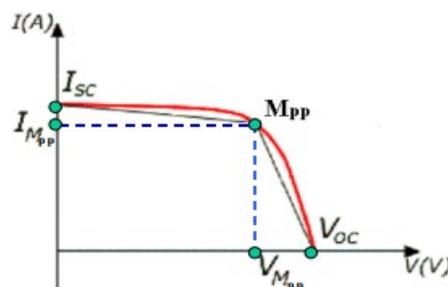


Figura 1.4.10 Curva de corriente-voltaje.

En figura 1.4.10 se pueden ver las medidas típicas que definen una célula.

➤ **Intensidad de cortocircuito *ISC*:**

Es aquella que se produce a tensión cero y puede ser medida directamente con un amperímetro conectado a la salida de la célula solar. Su valor varía en función de la superficie y de la radiación luminosa a la que la célula es expuesta. Para dar una idea de su orden de magnitud se dirá que su valor típico es de decenas de miliamperios ($\approx 10 - 35$) por cada centímetro cuadrado de célula.

➤ **Tensión de circuito abierto *VOC*:**

Es la tensión que podemos medir al no existir una carga conectada y representa la tensión máxima que puede dar una célula. Su medida se realiza simplemente conectando un voltímetro entre sus bornas, y su valor oscila, según el tipo de construcción interior de la célula, alrededor de los $0.5 V$.

➤ **Punto de máxima potencia *MPP*:**

Es la potencia eléctrica máxima que puede suministrar una célula y se define por el punto de la curva $I - V$ donde el producto de la intensidad IPP producida y la tensión VPP es máximo. Todos los restantes puntos de la curva generan valores inferiores de dicho producto.

➤ **Factor de forma *FF*:**

Viene definido por la ecuación 1.6:

$$FF = \frac{I_p V_p}{I_{cc} V_{ca}} \quad (1.6)$$

El factor de forma FF siempre será un valor más pequeño que la unidad, y la célula solar será tanto mejor cuanto más se aproxime el valor del factor de forma a dicha cifra. Normalmente, en las células comerciales FF está comprendido entre el 0.7 y el 0.8. El FF resulta ser un parámetro de gran utilidad práctica, ya que al ser evaluado con el otro tipo de células nos da una idea de la calidad de dicho dispositivo, comparativamente hablando.

➤ **Eficiencia de conversión, rendimiento:**

Por último, otro parámetro que define la calidad de una célula fotovoltaica es el rendimiento o eficiencia de conversión (η), representado por la siguiente ecuación 1.7:

$$n = \frac{W_p}{W_r} \quad (1.7)$$

Donde W_p (potencia pico) es igual al producto de la intensidad pico (I_p) por la tensión pico (V_p), representada en la figura por el rectángulo rayado, y W_r la potencia de radiación incidente sobre la superficie de la célula solar.

1.4.6 Factores que afectan la característica I-V de la célula: Efecto de la iluminación, efecto de la temperatura.

Para conocer bien el funcionamiento de una célula fotovoltaica se debe tener presente dos conceptos fundamentales:

- a) La tensión en bornas de una unión p-n varía en función de la temperatura, pero a una determinada temperatura esta tensión es constante.
- b) La corriente suministrada por la célula solar a un circuito exterior es proporcional a la intensidad de la radiación y a la superficie de la célula.

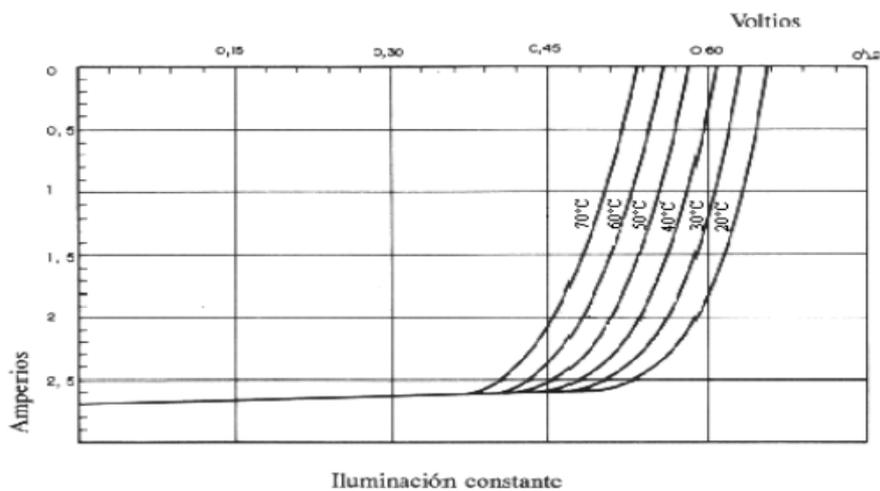


Figura 1.4.11 Curva de corriente-radiación.

En figura 1.4.11 la gráfica muestra claramente estos conceptos, ya que observamos que, si mantenemos una iluminación constante y variamos la

temperatura, la curva inicial se va desplazando a la vez que la tensión de circuito abierto va haciéndose más pequeña.

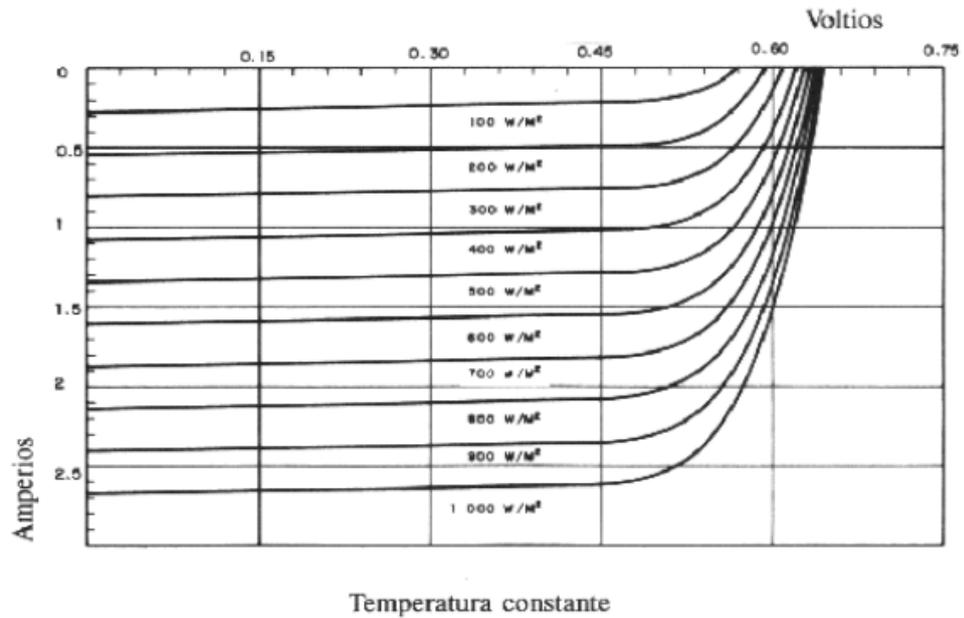


Figura 2 Influencia de la temperatura I.

En la otra gráfica de la figura 1.4.12 se observa que si se mantiene la célula a una temperatura constante y se disminuye la radiación incidente, se obtiene unas corrientes de cortocircuito cada vez menores, pero que están relacionadas proporcionalmente con las iluminaciones. Si ahora se observa el comportamiento de la tensión, corriente y rendimiento de la célula aunándolas en un solo gráfico como el de la figura 1.4.13, se obtienen deducciones muy interesantes, como que al aumentar la temperatura la tensión baja, mientras que la curva correspondiente a la intensidad incrementa su valor en menor proporción, lo que se traduce en un descenso del rendimiento. Se podrá decir, en consecuencia, que a medida que la temperatura a la que se encuentra la célula aumenta, disminuye el rendimiento, produciéndose el efecto contrario, es decir, un aumento del rendimiento en función de unas temperaturas más bajas.

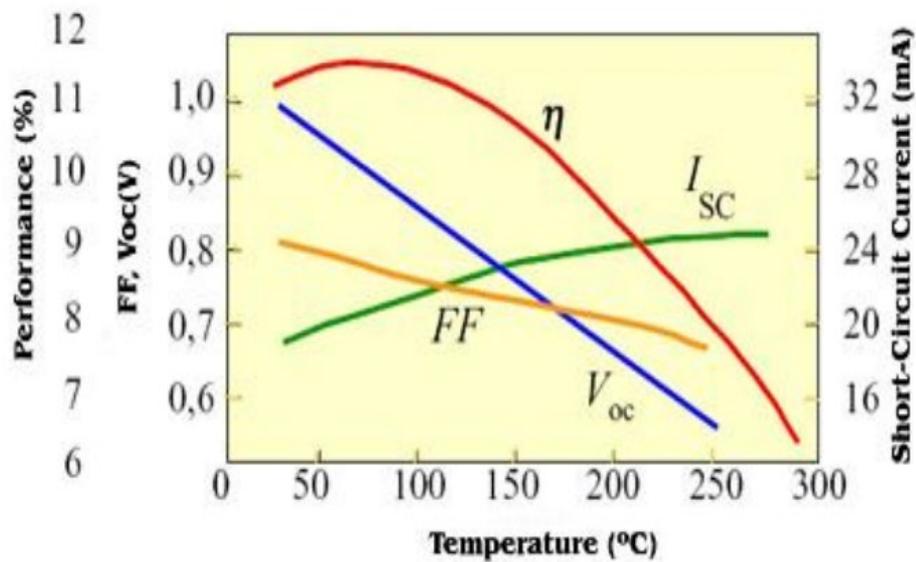


Figura 1.4.33 Influencia de la temperatura II.

1.4.7 Proceso de fabricación de las células monocristalinas.

El silicio se obtiene principalmente de la sílice (óxido de silicio), de la que, por el método de reducción mostrado en la figura 1.4.14 se extrae el silicio de grado metalúrgico, que dispone de una pureza del 98%, que no al ser suficiente, ha de volverse a purificar hasta llegar al extremo de 99.999%.

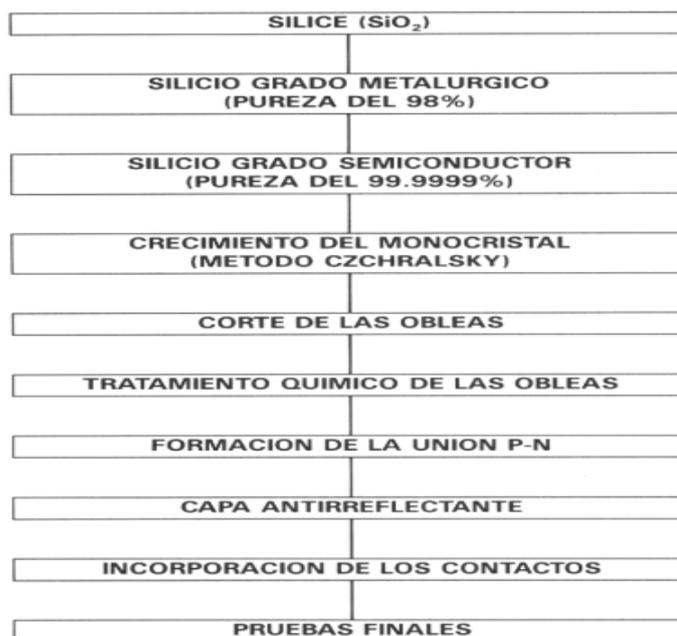


Figura 1.4.44: Proceso de fabricación.

Este silicio puro, recibe el nombre de silicio de grado electrónico, es el comúnmente utilizado para la fabricación de células. No obstante, se está investigando en la fabricación de un silicio denominado grado solar, de tal manera que no llegue a ser tan puro y costoso como lo es el de grado electrónico, pero pueda sustituirlo con eficacia reduciendo a la vez el costo.

Una vez obtenido el material adecuado por su pureza, comienza el propio proceso de fabricación, que consiste en introducir el silicio 99.9999% en un crisol junto con impurezas aceptoras (boro), para formar una masa fundida llevando el conjunto a una temperatura de 1400°C aproximadamente. Una vez que el material se encuentra en estado líquido, se dispone de una varilla cuyo extremo tiene un germen de silicio que, al ponerse en contacto con la masa, da comienzo al proceso de solidificación del material. Esta varilla tiene un movimiento rotativo y lentamente ascendente, de tal forma que va solidificando un tocho metálico de un diámetro que corresponde a la velocidad de ascenso y giro que se imprima a la varilla. Esta es la razón por la cual la mayoría de las células solares tienen forma circular, y en el caso de querer hacerlas cuadradas, se tendría que cortar los cuatro trozos laterales hasta dejar el cuadrado inscrito en dicho círculo.

Los lingotes producidos por el método descrito anteriormente, denominado método de Czochralsky, suelen tener una longitud de un metro y diámetros comprendidos entre 20 y 200 milímetros. El tiempo invertido en la producción de uno de estos lingotes puede llegar a ser de 8 horas. Una vez que se dispone del tocho de silicio monocristalino, se trocea en finas obleas que posteriormente se convertirán en las células solares. El corte se realiza mediante sierras circulares con un alto grado de precisión, obteniendo obleas de un espesor del orden de 0.3 milímetros. En esta etapa se llega a desperdiciar en polvo hasta un 40% del material, que puede ser nuevamente reciclado aunque con evidentes pérdidas económicas para el producto final.

La siguiente fase consiste en restablecer los efectos perniciosos que se han producido por efecto del corte. Esto se realiza introduciendo las obleas en baños químicos que restauran la capa superficial dañada.

El siguiente proceso consiste en la propia creación de la célula, o mejor dicho, de la unión p-n que formará la célula solar tal y como la podemos observar en realidad. Para ello se la introduce en hornos especiales a una temperatura entre 800 y 1000°C durante un tiempo prefijado y en una atmósfera que se encuentra cargada de átomos de impurezas donadoras (fósforo) y que se va difundiendo sobre la cara de la oblea que se quiere dopar con material n. La profundidad que alcanza la penetración de impurezas donadoras (fósforo) está en función de la temperatura del horno y de la duración del proceso. De esta forma, disponemos de una unión p-n creada en el interior de la oblea, que será capaz de producir corriente eléctrica al incidir la radiación.

Después de los procesos descritos anteriormente, la célula presenta una superficie que rechaza aproximadamente el 33% de la radiación que puede llegarle, dado su aspecto metálico. Por este motivo se procede a la aplicación de una capa antirreflectante que disminuya el valor rechazado a tan sólo un 10 – 12% mostrado en la figura 1.4.15, aumentando de esta manera la eficiencia de la célula. Normalmente para crear la capa antirreflectante se utiliza la evaporación al vacío, que consiste en una calefacción eléctrica que evapora el material antirreflectante depositado previamente. Otro método cada vez más utilizado consiste en la creación de pequeñas pirámides en la superficie del material, que realizan una función de rebote del rayo incidente, de forma que una gran parte de la radiación penetre dentro del semiconductor.

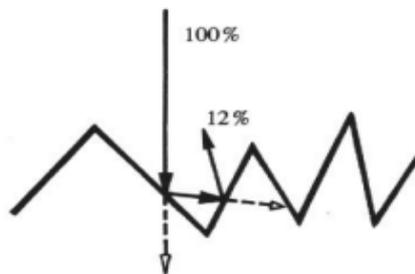
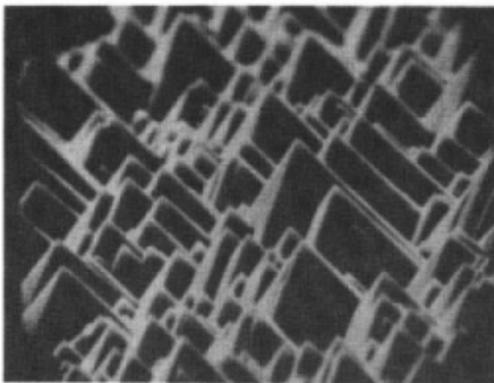


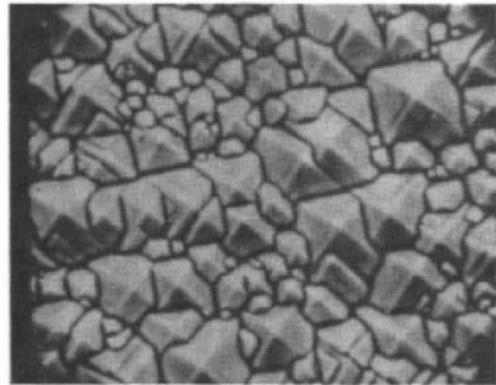
Figura 1.4.55 Método de texturizado

Este método se denomina texturizado mostrado en la figura 1.4.16 y se crea mediante reacciones químicas en la superficie de la célula. Presenta grandes

ventajas de costo, además de poderse realizar antes del dopado de fósforo como después.



Vista a 80° (2000×)



Vista normal (2000×)

Figura 1.4.66: Imagen del silicio

A continuación, para hacer útil la energía que ésta proporciona se debe de proveer a la célula de contactos eléctricos capaces de recolectar los electrones que se liberan por acción de los fotones que contiene la luz. El diseño del dibujo sobre la superficie de la célula es muy importante, ya que cuantos más contactos se pongan mayor cantidad de electrones serán capturados pero, en contrapartida, menor iluminación llegará a la superficie activa, debido a que estos contactos no son transparentes. Por tanto, se debe llegar a un compromiso entre las dos exigencias. Por una parte, se debe permitir que la mayor superficie de la célula quede libre para recibir la radiación, y simultáneamente se debe cubrir lo mejor posible ésta para recolectar los portadores de carga en la mayor cantidad posible.

El material de que están constituidos los electrodos, tanto frontal como posterior, suele ser una aleación de diversos metales, como son: la plata, titanio, paladio, cobre, aluminio, etc., variando en función del tipo de célula solar que se fabrique.

Los métodos para la consecución de contactos fiables son principalmente la evaporización al vacío, el procedimiento electroquímico y el serigráfico. El primero utiliza cañones electrónicos que crean el contacto aplicando las capas de diferentes metales sucesivamente, sufriendo posteriormente un

tratamiento térmico para que el material penetre en la célula y realice un buen contacto eléctrico. Este método es muy lento pero de una gran calidad.

El siguiente método, el electroquímico, se produce mediante la inmersión de la célula en líquidos controlados en temperatura. Pueden utilizarse materiales como níquel y cobre, que son depositados en capas diferentes, pasando posteriormente por un tratamiento térmico.

Los procedimientos serigráficos quizá son hoy en día los más usados, dado su bajo costo de producción, así como la facilidad de su automoción. Utilizan una pasta conductora compuesta por plata, titanio, aluminio, etc., que se deposita por serigrafía en la célula solar, que posteriormente se introduce en un horno que difunde el material conductor en la superficie de la oblea. De esta forma y de dos pasadas (cara frontal y posterior), queda lista la célula para la última parte que cierra el proceso de fabricación de la misma esta se puede ver en la figura 1.4.17. Estas son las pruebas eléctricas para clasificar sus características. Se realizan de una forma automática, analizando su respuesta de $I - V$ (intensidad – tensión), así como la respuesta espectral.

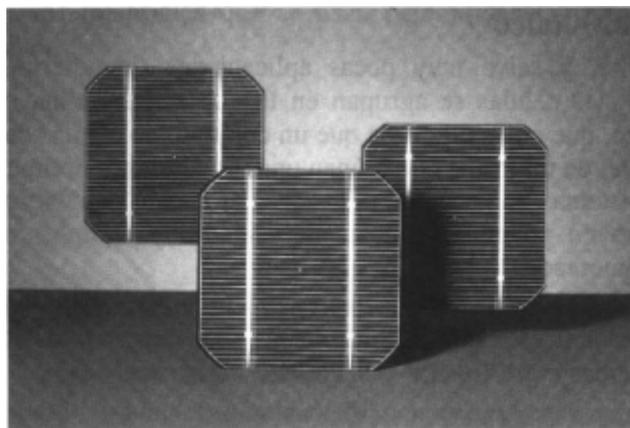


Figura 1.4.77 Células solares

1.4.8 Tipos de células fotovoltaicas.

➤ Células de silicio policristalino:

Son aquellas obtenidas a partir de procesos que no necesitan un control exhaustivo de la temperatura en la solidificación del material de silicio, ni tampoco un crecimiento controlado de su red cristalina. Se les da el nombre

de poli-cristalinas, ya que la solidificación no se hace en un solo cristal sino en múltiples.

Durante los años 1981 -1982, se especuló con la posibilidad de un costo sensiblemente más barato que el de la tecnología mono-cristalina. En honor a la verdad, hoy día la diferencia no resulta tan grande y tan sólo algunos fabricantes siguen con este tipo de tecnología en sus líneas de fabricación, no extendiéndose su uso en la medida que indicaban las previsiones iniciales.

Del primer rendimiento obtenido al inicio de la década de los ochenta, que se situaba entre el 7 y el 8 %, se han logrado incrementar a valores próximos al 12% , siendo incluso posible, en los procesos de fabricación refinados, llegar a valores del 14% . No obstante, su precio difiere en estos casos poco o nada respecto a la tecnología mono-cristalina tradicional y habitualmente utilizada.

Una gran ventaja en la fabricación de células de silicio mono-cristalino, es la posibilidad de producirlas directamente en forma cuadrada, lo que facilita enormemente la fabricación de paneles solares compactos sin posteriores mecanizaciones de la célula.

➤ **Células de sulfuro de cadmio y sulfuro de cobre:**

Se han experimentado también en la obtención de células compuestas por dos capas: una de sulfuro de cadmio (*SCd*) y otra de sulfuro de cobre (*SCu2*) . La ventaja de este sistema radica en que se utiliza muy poco material activo en un proceso fácil de fabricación. Los rendimientos máximos obtenidos en laboratorio no superan el 10% , viéndose disminuidos a la mitad una vez que se llegara a la práctica industrial.

El grave problema que presenta este tipo de células es la degradación que se produce con el paso del tiempo. No obstante, se está investigando en los diferentes motivos que producen esta inestabilidad con el fin de que, al subsanarlos, se pueda contar con una alternativa de bajo costo a los materiales actualmente utilizados.

➤ **Células de arseniuro de galio:**

Son quizá estas células fotovoltaicas la más indicadas para la fabricación de paneles, ya que su rendimiento teórico alcanza límites cercanos al 27-28% en su versión mono-cristalina. El problema principal radica en que este material es raro y poco abundante, hecho por el cual no se ha empezado su manipulación hasta hace relativamente poco tiempo, estando su tecnología poco avanzada y con costos elevados.

Una característica interesante del AsGa es su elevado coeficiente de absorción, que hace que con poco material se obtenga una eficiencia elevada. Otra particularidad de suma importancia es que puede trabajar a temperaturas altas con menores pérdidas que el silicio mono-cristalino, lo que permite ser utilizado con ventajas en sistemas de concentración.

En definitiva, las células de arseniuro de galio presentan buenas características, pero su uso se ve limitado por el elevado coste de producción de este material, que hace, por el momento, que su precio no resulte competitivo frente a las tecnologías actualmente utilizadas.

➤ **Células bifaciales:**

En esta tecnología de fabricación consiste en crear una doble unión (normalmente n+-p-p+) de tal forma que la célula sea activada tanto en la cara frontal como en su cara posterior. Este procedimiento permite captar la radiación frontal y la reflejada en el suelo (albedo), que es transformada en electricidad en la parte posterior de la célula fotovoltaica. Lógicamente, la energía producida por el albedo es menor que la que produce la radiación directa, pudiendo llegar su valor al 30% de la energía total, cuidando la calidad de la superficie de reflexión, así como ciertas condiciones mecánicas en la colocación del panel formado por este tipo de células.

Las células bifaciales obtienen, por tanto, mejor rendimiento que las monofaciales, pero lógicamente el costo de producción se eleva, ya que se necesitan varios tratamientos extras en el dopaje del silicio para crear las diferentes capas activas.

➤ **Células de silicio amorfo:**

La gran ventaja de la utilización del silicio amorfo para la fabricación de células fotovoltaicas radica en el espesor del material a utilizar, ya que puede llegar a ser 50 veces más finas que el equivalente fabricado de silicio monocristalino.

El silicio amorfo tiene unas propiedades totalmente diferentes al silicio cristalino. Por ejemplo, su elevada velocidad de recombinación, producida por la gran cantidad de imperfecciones en la red cristalina que crean núcleos activos para la recombinación. Este defecto se ve compensado en parte por la adición de hidrógeno (en proporciones cercanas al 50%), que hace disminuir la velocidad de recombinación de los portadores.

El silicio amorfo presenta también un alto coeficiente de absorción, lo que permite la utilización de espesores de material activo muy pequeños.

Existen estudios para ver la viabilidad de fabricar células solares de silicio amorfo superponiendo varias capas, cada una sensible a unas determinadas radiaciones, con lo cual se podrían obtener rendimientos próximos a los del silicio monocristalino al sumarse la efectividad de cada una de ellas.

El desarrollo histórico del silicio amorfo desde que, aproximadamente en 1983, saliera al mercado fotovoltaico con un rendimiento entre el 3% y 4%, en su versión de unión simple p-n, ha llegado a conseguir eficiencias del 9% en este mismo tipo de unión, y valores próximos a los estándares del silicio monocristalino en las versiones multicapa.

En definitiva, el silicio amorfo se presenta como un candidato importante para la fabricación de células fotovoltaicas, una vez que sean resueltos los problemas de degradación que sufren las células al ser expuestas al sol después de un determinado tiempo de trabajo.

Un estudio reciente llega a la conclusión de que el parámetro causante de dicha disminución de potencia entregada es el FF (factor de forma), debido a una disminución de la longitud de colección de portadores, y propone ciertas

soluciones, entre las cuales se cita la utilización mayor de las células de silicio amorfo multicapa.

El costo y fabricación de las células de silicio amorfo es mucho más bajo, sobre el papel, que el de las tecnologías hoy utilizadas. Por este motivo, puede llegar a ser en un futuro el artífice de la utilización masiva de la energía solar fotovoltaica.

1.4.9 Curva característica del módulo fotovoltaico.

Como se ha explicado anteriormente, la curva característica corriente tensión de una célula fotovoltaica puede describirse con suficiente precisión por la ecuación 1.8:

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{mv_t} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (1.8)$$

Por lo tanto, para el caso de un módulo fotovoltaico, su característica eléctrica dependerá fundamentalmente del número de células en serie y paralelo que posea. Si suponemos que todas las células constituyentes de un módulo fueran iguales, la corriente generada por el módulo sería igual a la corriente de la célula multiplicada por el número de células en paralelo (ver ecuación 1.9), y el voltaje sería igual al voltaje de la célula multiplicado por el número de células en serie (ver ecuación 1.10).

$$I_{mod} = I_c \times N_p \quad (1.9)$$

$$V_{mod} = V_c \times N_s \quad (1.10)$$

Donde N_p y N_s son respectivamente el número de células en paralelo y en serie que contiene el módulo según se muestra en la siguiente figura 1.4.18:

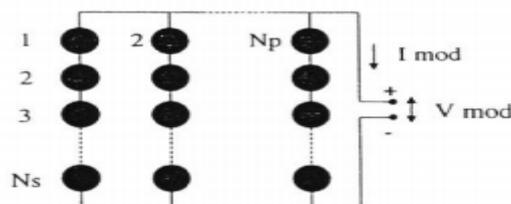


Figura 1.4.88 Módulo de células

Teniendo esto en cuenta, si se combinan estas tres últimas ecuaciones se obtendría la ecuación 1.11, para la curva característica de un módulo fotovoltaico formado por células iguales y con relación a los parámetros de la célula:

$$I = N_p \left(I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{V/N_s + IR_s/N_p}{m v_t} \right) - 1 \right] - \frac{V/N_s + IR_s/N_p}{R_p} \right) \quad 1.11$$

Esta ecuación muestra el mismo comportamiento que la característica I-V de una célula, y de hecho en la práctica, cuando se habla de la ecuación característica y los parámetros fundamentales de un módulo fotovoltaico, no se suele hacer referencia a su relación con la célula solar sino que se escribe la primera ecuación con todos los parámetros característicos (I_L , I_0 , m , R_s y R_p) del módulo.

1.5 Conclusiones del capítulo.

Una vez elaborado el plan analítico de la asignatura Energía Solar Fotovoltaica, junto con los temas a impartir, objetivos, y sistemas de conocimientos a adquirir nos encontramos en un punto importante en el desarrollo de los conocimientos y la forma de lograr las habilidades requeridas en el tiempo preparado para la asignatura.

Capítulo II: Descripción del objeto de estudio (Entrenador modular de Energía Solar Fotovoltaica "MINI-EESF") y desarrollo de las prácticas.

2. Introducción de capítulo.

En este capítulo se realizará la descripción del Entrenador modular de Energía Solar Fotovoltaica "MINI-EESF" y se abordan las indicaciones a dar al estudiante a la hora de enfrentarse a una práctica de laboratorio junto a las prácticas de laboratorio.

2.1 Descripción del Equipo.

El Entrenador Modular de Energía Solar Fotovoltaica "MINI-EESF" (ver figura 2.1) es un equipo, a escala de laboratorio, diseñado para estudiar todos los parámetros que gobiernan la conversión directa de radiación procedente del sol en electricidad.

El entrenador está basado en diferentes módulos de aplicación y en paneles solares fotovoltaicos montados en estructuras móviles.

Está especialmente diseñado para el estudio teórico y práctico de las instalaciones eléctricas con energía solar fotovoltaica, las configuraciones típicas usadas en instalaciones fotovoltaicas y el funcionamiento de los diferentes elementos que intervienen en la conversión.

La potencia obtenida de la energía solar puede ser:

- Regulada para obtener potencia CC para cargar una batería, estudiando parámetros tales como el nivel de carga de corriente de salida del módulo solar, tensión de la batería, etc.
- Suministrada a las cargas CC, estudiando parámetros tales como la corriente de salida del módulo solar y la corriente consumida por las cargas.
- Convertida en potencia CA para ser suministrada a las cargas CA, estudiando parámetros tales como la corriente consumida por las cargas. Inyectada a la red pública, estudiando parámetros tales como corriente y tensión de salida del módulo solar simulado, potencia suministrada a la red eléctrica pública, frecuencia y voltaje de la red, etc.

Existen tres versiones diferentes con posibilidades prácticas y complejidad diferentes: MINI-EESF, MINI-EESF/M y MINI-EESF/B. En nuestra escuela tenemos el módulo MINI-EESF/M él se realizará una descripción a continuación de sus componentes.



Figura 2.1 Entrenador Modular de Energía Solar Fotovoltaica "MINI-EESF/M"(Intermedio)

2.1.1 Principales características.

- Suministro y Consumo a 12 V (CC) .
- Suministro y Consumo en corriente alterna (CA) .

2.1.2 Módulo fotovoltaico.

- Panel solar (poli-cristalino) montado sobre una estructura de aluminio anodizado, con ruedas para su movilidad, con célula calibrada para medir la irradiación solar.
- Está compuesto de una serie de 36 células fotovoltaicas (35 x 55mm) de alto rendimiento y tiene una potencia típica de 50Wp a una tensión de 17 VCC.

- Tanto las protecciones como los materiales utilizados le confieren una muy buena resistencia al agua, a la abrasión, al impacto de granizo y a otros factores ambientales adversos.

2.1.3 Datos técnicos.

- Potencia máxima nominal: 66W.
- Voltaje en el punto máximo de potencia (V_{mpp}): 17,8 V.
- Corriente en el punto máximo de potencia (I_{mpp}): 3,70 A.
- Corriente de cortocircuito (I_{sc}): 4,05 A.
- Tensión de circuito abierto (V_{oc}): 22,25 V.
- Dimensiones: 660 x 35,5 x 780 mm. Peso: 3 Kg. aprox.

2.1.4 Módulo de lámparas.

- Compuesto por dos lámparas para simular la luz del sol. Potencia regulada de 0 a 400 W.

Batería, que ofrece unas óptimas prestaciones en aplicaciones de baja potencia.

Conjunto de cables de interconexión.

Rack para la colocación de los módulos:

2.1.5 Módulos que lo integran.

- N-ES10. Controlador de carga solar con detección automática del voltaje de operación de 12V ó 24V. Monitoriza varios parámetros tales como la tensión, corriente y nivel de carga de la batería, corriente de carga, estado, etc. Funciones adicionales que pueden ser activadas como los ajustes, la función de luz nocturna y el autotest. El regulador está equipado con varios dispositivos para proteger su electrónica, la batería y las cargas.
- N-ES20. Módulo de cargas que incorpora dos lámparas de 12 V, 20W, con interruptores independientes.
- N-ES30. Inversor CC/CA que produce una potencia de salida con forma de onda senoidal de 230V/50Hz \pm 2% con un voltaje nominal de entrada de 12VCC. Dos modos de operación diferentes: modo continuo y modo ASB (Auto Standby) para reducir el consumo. Está provisto de un sistema

de diagnóstico que indica al usuario el estado mediante diferentes secuencias de flashes.

- N-ES40. Módulo de medidas de tensión CA hasta 250V. y CC hasta 250 V. (multímetro digital).
- N-ES50. Módulo de cargas que incorpora dos lámparas de 220V., 50 W., con interruptores independientes.
- N-ES80. Módulo de medidas de la irradiación solar (W/m^2) y la corriente hasta 10 A., con multímetro digital.
- N-ES90. Módulo de cargador de baterías de 12 VCC.

Cables y Accesorios, para un funcionamiento normal.

Este equipo se suministra con los siguientes manuales: Servicios requeridos, Montaje e Instalación, Puesta en marcha, Seguridad, Mantenimiento y manual de Prácticas.

2.1.6 Dimensiones y Pesos.

- Rack con los módulos:

Dimensiones: 645 x 325 x 925 mm. aprox.

Peso: 10 Kg. aprox.

- Módulo fotovoltaico:

Dimensiones: 730 x 510 x 1150 mm. aprox.

Peso: 10 Kg. aprox.

2.1.7 Elementos Opcionales.

- PSA/PC. Panel solar fotovoltaico poli-cristalino.
- PSA/MC. Panel solar fotovoltaico mono-cristalino.
- PSA/AM. Panel solar fotovoltaico amorfo.

2.2 Guía de laboratorios.

2.2.1 Indicaciones metodológicas y de organización.

Las formas fundamentales de docencia en las asignaturas son conferencias, clases prácticas, seminarios y laboratorios.

En las conferencias se explican los fundamentos teóricos de electricidad, así como sus leyes, tanto la aplicación a fenómenos físicos reales apoyándose en conocimientos alcanzados por los estudiantes en disciplinas tales como Matemática, Física, Ingeniería Eléctrica, Filosofía, Computación y Mediciones Eléctricas.

Las prácticas de laboratorios son las que permiten complementar el objetivo instructivo fundamental de la asignatura. En las mismas se debe tratar de asegurar el trabajo individual de los alumnos y la posibilidad de ejercitar las habilidades para el montaje y manejos de los instrumentos, así como el análisis de los resultados de cada práctica de laboratorio. Estas prácticas se imparten de manera frontal y cíclica. Además, pueden variar de un curso a otro en dependencia de la posibilidad de tiempo y medios.

En los seminarios, como tipo de clases que tiene los objetivos instructivos fundamentales de que los estudiantes consoliden, amplíen profundicen, discutan, generalicen los contenidos orientados y aborden las resoluciones de problemas mediante la utilización de los métodos propios de la rama del saber y de la investigación científica, desarrollan la expresión oral, el ordenamiento lógico de los contenidos y las habilidades en la utilización de las diferentes fuentes de conocimiento.

2.2.2 Introducción al desarrollo de las guías de laboratorios.

Las prácticas de laboratorio tienen por esencia la adquisición de habilidades prácticas a través de un trabajo independiente, aplicativo y creador de los estudiantes, lo cual se logra mediante la utilización activa de los métodos y leyes que rigen el análisis de cada una de las prácticas dándole a éstas un enfoque investigativo.

La manera frontal y cíclica de impartir las prácticas de laboratorio requiere de una planificación, organización, control y una correcta base orientadora para la preparación previa y la ejecución de la tarea.

La orientación del docente para este tipo de enseñanza comienza desde el primer encuentro de práctica, a través del cual el estudiante se familiariza con el laboratorio, los objetivos que con él se persiguen y las habilidades que debe adquirir. En este encuentro el docente indicará los diferentes puestos

de trabajo, los cuales deben estar identificados con la enumeración de las prácticas en correspondencia con lo indicado en las guías de estudio, y realizará un recorrido a través del laboratorio familiarizando a los estudiantes con los objetivos de cada práctica e indicando los instrumentos a utilizar, lo que contribuirá a la motivación para la búsqueda de información.

Un factor importante son las condiciones laboratorio, donde deben quedar bien definidos los puestos, la iluminación y limpieza del local como elementos que influyen en el buen desarrollo de las tareas, resultando primordial garantizar el cumplimiento de las normas de seguridad establecidas para trabajos realizados bajo la acción de la corriente eléctrica.

2.2.3 Planificación, organización y control de las prácticas.

- **Planificación**

El profesor de manera anticipada debe indicar el número de prácticas a realizar, así como la tarea que debe realizar el estudiante en las computadoras, asociadas a cada una de las mismas, tomando en cuenta las condiciones existentes y realizar la distribución de los estudiantes en subgrupos, no excediendo a un número mayor de tres estudiantes por puesto siempre que las condiciones lo permitan.

Debe realizar un gráfico de distribución de prácticas por semanas a partir del horario de clases donde se indicará la fecha de realización para cada subgrupo.

- **Organización**

Para una correcta organización deben existir ciertas condiciones como son las siguientes:

- Existencias de al menos un puesto de trabajo para cada práctica.
- Medios técnicos requeridos para la realización de la práctica.
- Computadoras habilitadas con los softwares necesarios para el complemento de las actividades en el caso que se necesiten.
- Literatura con el contenido adecuado para una correcta autopreparación. A través de la autopreparación se logra el trabajo independiente de los estudiantes, por tanto, las guías de laboratorio deben incluir:

- Tema.
- Introducción teórica.
- Estudio previo.
- Bibliografía.
- Preguntas de control.
- Programa de trabajo.
- Orden de realización del trabajo.
- Instrumentos a utilizar.
- Contenido del informe.

- **Control**

El control del aprendizaje puede ser variado. Las formas frontal y cíclica de realización de las prácticas implican un control sistemático obligatorio de los conocimientos y habilidades, esto se puede realizar de la siguiente forma:

- A través de la resolución de la tarea indicada como autopreparación en las guías de laboratorios en las computadoras.
- A través de preguntas de entrada oral o escritas que permitan valorar el conocimiento adquirido de los objetivos de la práctica, así como de las expresiones para la determinación de las magnitudes básicas, derivadas y de los medios técnicos a emplear para la realización de las prácticas.
- Mediante la realización de cada práctica, el profesor mediante la observación del trabajo que realizan los estudiantes, podrá verificar la asimilación de los contenidos, permitiéndose la corrección en los casos necesarios.
- Al concluir cada práctica, o en el transcurso de la misma, el estudiante demostrará sus habilidades en el montaje del esquema.
- Se le permitirá al estudiante realizar la siguiente práctica solo después de haber efectuado el informe de la práctica anterior, su calificación estará en dependencia de la objetividad del análisis por medio de las conclusiones, y la demostración de las habilidades adquiridas.

2.3 Desarrollo de las prácticas con el Entrenador modular de Energía Solar Fotovoltaica "MINI-EESF".

2.3.1 Práctica 1: Dependencia de la tensión de circuito abierto (V_{oc}) con los lúmenes.

Objetivo:

En esta práctica se pretende que el alumno determine la dependencia de la tensión de vacío (V_{oc}) con el grado de luminosidad.

Material requerido:

- Célula solar calibrada (ES80).
- Voltímetro (N-ES80).

Procedimiento de ensayo:

1. Conecte la célula calibrada con el voltímetro, como indica la figura 2.2:



Figura 2.2 Conexiones eléctricas

2. Cubra parcialmente la célula, de tal manera que la luz incida de forma parcial en la célula y anote el valor de la tensión en circuito abierto.
3. Para diferentes valores de oscuridad anótelos en la tabla 2.1 y represente los datos obtenidos en una gráfica analizando la dependencia de la tensión en abierto con la luminosidad.(ver figura 2.3)

Tabla 2.1: % de oscuridad / Voc

% de oscuridad	Voc
0	0,56
25	0,53
50	0,52
75	0,48
100	0,2

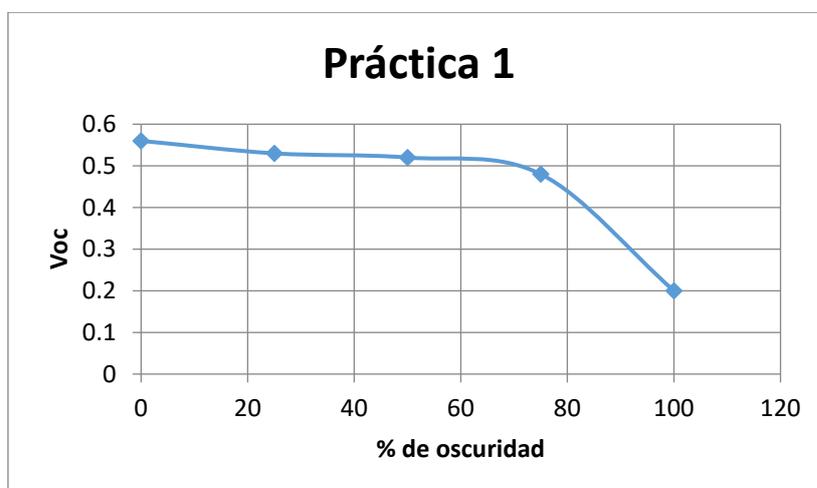


Figura 2.3: Dependencia de la tensión en abierto con la luminosidad

2.3.2 Práctica 2: Medida de la energía solar.

Objetivo:

La finalidad de esta práctica es medir la energía solar incidente en el panel con diferentes grados de inclinación. De esta manera el alumno podrá determinar cuál es el ángulo idóneo para obtener la máxima radiación en una determinada situación.

Material requerido:

- Célula solar calibrada (ES80).
- Amperímetro (N-ES40).

Procedimiento de ensayo:

- Oriente el panel hacia el Sol.

- Sitúe el panel con una inclinación de 10° y mida el valor de W/m^2 anótelos en la tabla 2.3, a partir de la tabla 6 esta tablas está representada en la figura 2.4 la cual corresponde a la calibración del sensor de radiación. Repita el paso anterior para diferentes valores de ángulo de inclinación y represente los datos en la gráfica (ver figura 2.5)

Tabla 2.2:

Ángulo de inclinación	I(mA)	(W/m ²)
10	230	709,9901
20	262	808,8029
30	278	858,2093
40	291	898,352
50	291	898,352

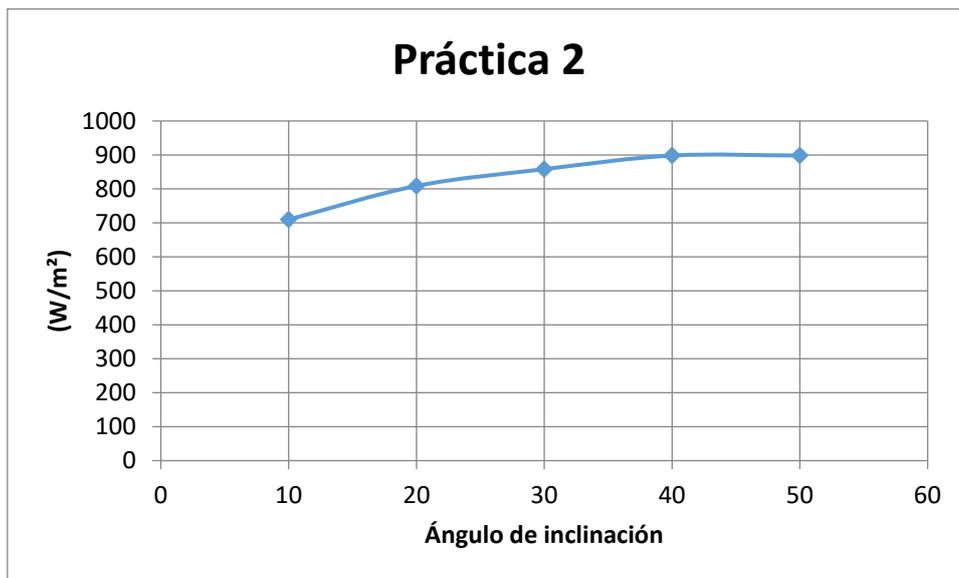


Figura 2.4

Tabla 2.3 Calibración del sensor de radiación.

Wxm ²	mA
------------------	----

1000	324
950	307,5
900	291,6
800	259,2
750	243
600	194,4
500	162
400	129,6
300	97,2
250	81

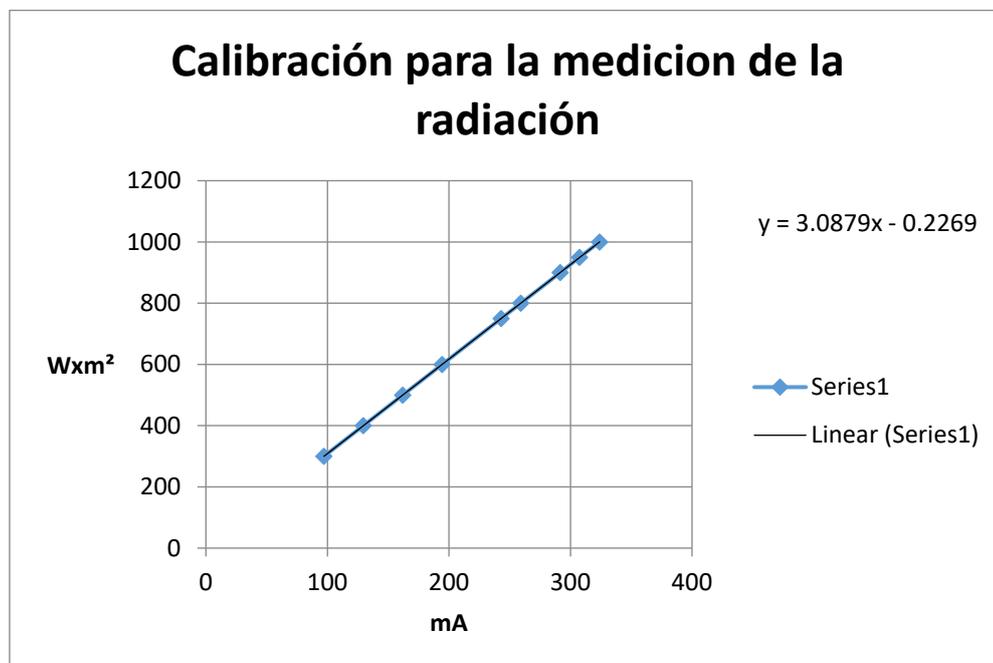


Figura 2.5

2.3.3 Práctica 3: Medida de la tensión del panel solar en vacío.

Objetivo:

Obtener la tensión del panel solar en vacío. De tal manera que el alumno determine uno de los parámetros característicos del panel solar.

Material requerido:

- Célula solar calibrada (ES80).

➤ Voltímetro (N-ES80).

Procedimiento de ensayo:

- Oriente el panel directamente hacia el Sol.
- Varíe el ángulo con respecto al Sol, anotando en la tabla 2.4 el valor de la tensión dada por el multímetro midiendo en los puntos de medida para el panel situados en el módulo regulador.

Tabla 2.4

Ángulo de inclinación	Voc	I(mA) panel	I(mA) celula	(W/m ²)
10	21,3	240	240	740,8691
20	22	261	261	805,715
30	22,1	273	273	842,7698
40	22,2	265	265	818,0666
50	22,3	266	266	821,1545

- Represente la curva en función de los datos obtenidos anteriormente. (ver figura 2.5)

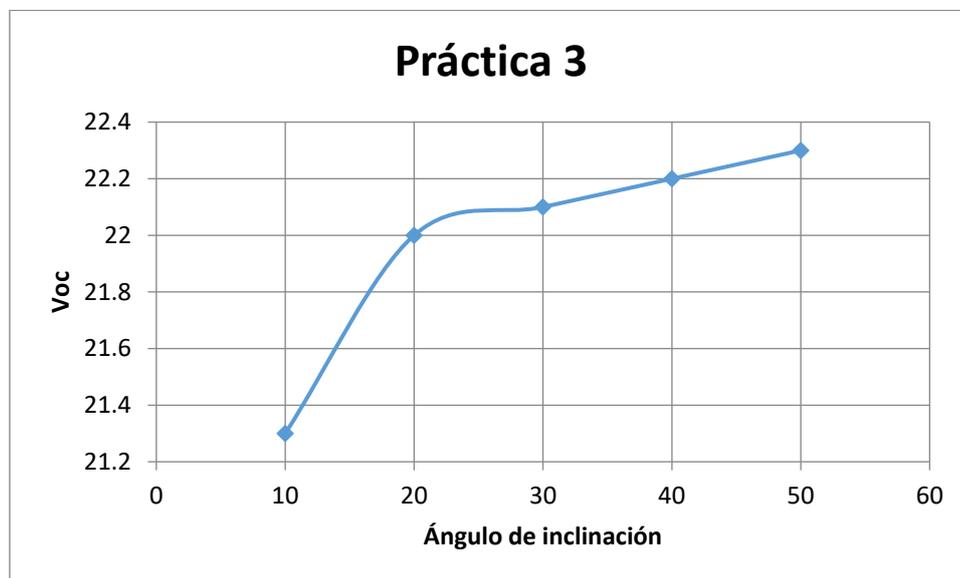


Figura 2.5

- Teniendo en cuenta la curva obtenida en la práctica anterior, represente ambas curvas con el mismo eje de coordenadas y determine si el punto

de máxima luminosidad corresponde con el de mayor tensión de circuito abierto. (ver figura 2.6)

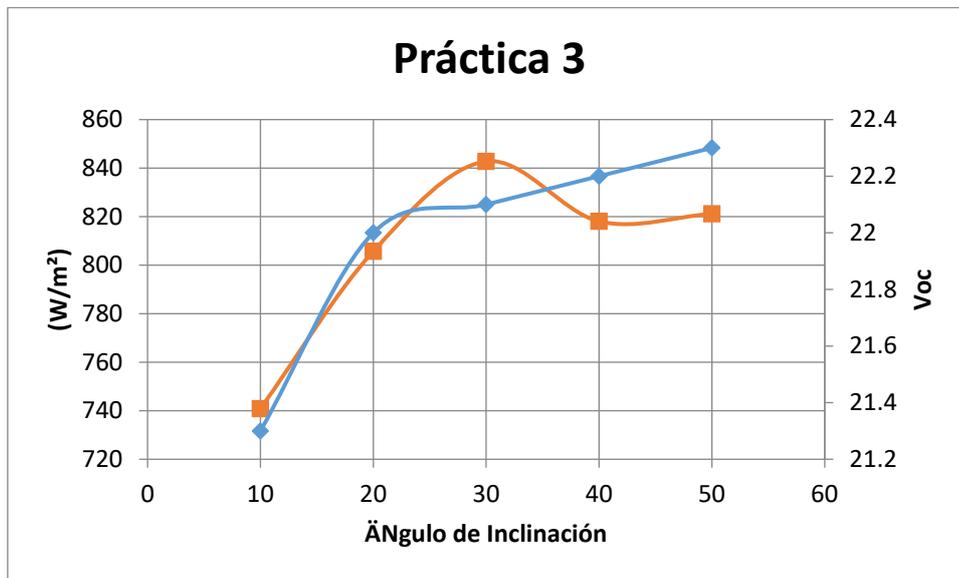


Figura 2.6

2.3.4 Práctica 4: Determinación de la disposición de las células en un panel solar.

Objetivo:

El objetivo de esta práctica consiste en determinar cómo están dispuestas las células en el panel fotovoltaico: serie, paralelo o mediante mallado.

Material requerido:

- Módulo fotovoltaico (MINI-EESF/M).
- Regulador de voltaje (N-ES10).
- Voltímetro (N-ES80).

Procedimiento de ensayo:

- Sitúe el panel con un ángulo determinado de aproximadamente 30°.
- A continuación mediante una cartulina, tape las columnas de células solares del panel de izquierda a derecha, obteniendo la tensión de circuito abierto y anotándolo en la tabla 2.5.

Tabla 2.5

% de oscuridad	Voc	I(mA)
----------------	-----	-------

0	24	285
25	20,4	278
50	18,3	261
75	16,2	278
100	14,3	0,04

- A continuación, por medio de una cartulina tape las filas de abajo hacia arriba y anote los valores dados por el voltímetro en la tabla 2.6.

Tabla 2.6

% de oscuridad	Voc	I(mA)
0%	23.5	276
25%	21.3	274
50%	18.4	273
75%	15.8	273
100%	14.3	265

- Sabiendo que la tensión de circuito abierto teórica del panel es de 22,25V y conociendo de antemano la tensión de la célula solar unitaria que es de $\sim 0,6$ V (compruebe el resultado según la práctica), determine cómo están dispuestas las células solares.
 - Las células solares están dispuestas en serie y en paralelo

Cuestiones:

¿Qué ventajas tiene que las células del panel solar estén dispuestas en paralelo?

- El voltaje de las placas solares permanece igual y constante. Pueden conectarse paneles con la misma tensión y diferente potencia, ya que la conexión de placas solares en paralelo sí permite aumentar la corriente manteniendo la misma tensión.

¿Qué ventajas tiene que las células del panel solar estén dispuestas en serie?

- Mediante la conexión en serie se conectan directamente las placas solares entre sí, conectando el polo positivo de un panel con el polo negativo del siguiente panel. A diferencia de la conexión en paralelo, se mantiene la intensidad y se suma el voltaje.

2.3.5 Práctica 5: Familiarización con los parámetros del regulador. Se realizará de forma teórica.

Objetivo:

Lo que se pretende con esta práctica es que el alumno se familiarice con la nomenclatura utilizada por el regulador, y compruebe que los datos obtenidos por éste se corresponden con la realidad.

Material requerido:

- Módulo fotovoltaico (MINI-EESF/M).
- Regulador de voltaje (N-ES10).
- Voltímetro (N-ES80).

Procedimiento de ensayo:

1. Verifique que los cables llamados “Batería” y “Panel Solar” están conectados correctamente al módulo N-ES10.
2. Compruebe con un voltímetro si la medida de voltaje de la batería proporcionada por el regulador se corresponde con la de los terminales de medida del regulador (símbolo batería).
3. Realice los pasos anteriores para distintos ángulos.
4. Navegue por los menús de datos con la ayuda del anexo y analice los datos.

2.3.6 Práctica 6: Conexión de cargas a tensión continua de 12V.

Objetivo:

El propósito de esta práctica es el estudio del modo de operación del módulo fotovoltaico junto con cargas de corriente continua.

Material requerido:

- Modulo fotovoltaico (MINI-EESF/M).
- Regulador de voltaje (N-ES10).
- Voltímetro (N-ES80).
- Módulo de cargas de 12VDC (N-ES20).

Procedimiento de ensayo:

1. Sitúe el panel con el ángulo adecuado para obtener la mayor radiación.
2. Realice el montaje que aparece en la figura 26 para una conexión paralela de las cargas.
3. Visualice los parámetros de consumo de las cargas conforme se indica en el manual de usuario del regulador y los resultados se muestran en la tabla 2.11
4. Realice el montaje que aparece en la figura 2.8 para una conexión serie de las cargas. Analice cómo varía la corriente y como trabaja el regulador dependiendo del tipo de conexión. Tenga en cuenta que al realizar la conexión serie es probable que una de las dos lámparas no se encienda debido a que se está realizando un divisor de tensión, pero es interesante visualizar las variaciones de corriente.



Figura 2.7 Conexión en paralelo



Figura 2.8: Conexión en serie

Tabla 2.11

Tipo de conexión	V	A
Paralelo	11.7V	3.4A
Serie	12.4V	1.1A

2.3.7 Práctica 7: Conexión de cargas a tensión alterna de 220Vac.

Objetivo:

El objetivo es estudiar la configuración típica utilizada en una instalación para el aprovechamiento de energía solar para el consumo en una vivienda convencional.

Material requerido:

- Módulo fotovoltaico (MINI-EESF/M).
- Regulador de voltaje (N-ES10).
- Multímetro (N-ES80).
- Inversor (N-ES30).
- Módulo de cargas de 230VAC (N-ES50).

Procedimiento de ensayo:

1. Sitúe el panel con el ángulo adecuado para obtener la mayor radiación.
2. Conecte a la entrada del inversor la tensión de 12VDC proveniente los terminales con el símbolo de la bombilla del módulo regulador. Mida la tensión de salida del inversor y verifique que corresponde a una tensión de 230VAC 50Hz.
3. Realice el montaje en serie como se ve en la siguiente figura 2.9 es el mismo que en la práctica 8, pero en este caso usando las cargas de 230VAC. Recordar que estamos tomando los 230VAC de la salida del inversor.

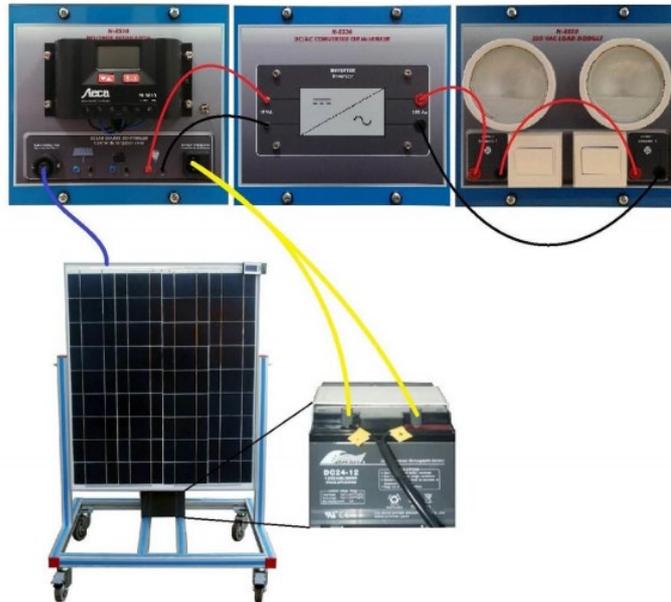


Figura 2.9: Conexión en serie

4. Visualice los parámetros de consumo de las cargas conforme se indica en el manual del regulador y los resultados se muestran en la tabla 2.12.

Tabla 2.12

Tipo de conexión	V	A
Serie	230V	2.5A

NOTA IMPORTANTE: Recuerde que la corriente del regulador está limitada a 10A por lo que no es posible la conexión en paralelo de las cargas.

2.3.8 Práctica 8: Carga de la batería. Se realizará de forma teórica.

Objetivo:

La finalidad de esta práctica es cargar la batería usando para ello el cargador de baterías. Este cargador puede cargar una batería DC mediante una conexión a la red eléctrica. Se verifica que se realiza la transformación de AC a DC.

Material requerido:

- Módulo fotovoltaico (MINI-EESF/M).
- Cargador de baterías (N-ES90).

Procedimiento de ensayo:

1. Conectar el cable **ROJO** al terminal **POSITIVO** de la batería y el cable **NEGRO** al terminal **NEGATIVO** como se muestra en la figura 2.10.
2. Conectar el cargador de baterías a la red eléctrica con los parámetros 180-265VAC/50-60Hz.



Figura 2.10: Conexión del cargador de baterías

3. Se podrá seleccionar el modo de carga a través del botón "MODE". Para la práctica seleccionamos el modo normal.

4. El usuario puede observar los diferentes estados de la carga de la batería a través de los diferentes LED de los que dispone el cargador.
5. Cuando la carga haya finalizado (LED "STORAGE") desconectar el cargador de la red eléctrica.
6. Desconectar los cables de la batería.

2.4 Conclusiones del capítulo:

Se describió el equipamiento de laboratorio Entrenador modular de Energía Solar Fotovoltaica "MINI-EESF" y se realizaron de forma presencial las prácticas orientadas y se anotaron todas las mediciones realizadas cuyos resultados obtenidos quedaron plasmados en forma de tabla y de gráfica.

Conclusiones generales.

1. La asimilación del nuevo equipamiento de laboratorio el Entrenador modular de Energía Solar Fotovoltaica "MINI-EESF" nos permitió elaborar una nueva guía de los laboratorios para la asignatura Energía Solar Fotovoltaica, con este equipamiento se obtienen resultados más precisos y permite realizar las prácticas de forma más amena.
2. La descripción del funcionamiento de cada equipo y sus posibilidades permite una mejor comprensión para el estudiante a la hora de su utilización.
3. Con el nuevo equipamiento el Entrenador modular de Energía Solar Fotovoltaica "MINI-EESF" es posible realizar otros laboratorios, los cuales servirán para aumentar los conocimientos de las asignaturas.

Recomendaciones.

1. Que se imparta la disciplina teniendo en cuenta el programa propuesto y ajustándose al nuevo plan de estudio.
2. Complementar las habilidades adquiridas en las prácticas de esta asignatura las cuales nos permitirán una mejor explotación de las potencialidades del equipamiento existente.

Bibliografía.

1. EDIBON (2022). "Entrenadores Modulares de Energía Solar Fotovoltaica (MINI-EESF). Equipamiento Didáctico para la Educación Técnica e Ingeniería." pág. 9.
2. Perpiñán Lamigueiro, O. (2018). Energía Solar Fotovoltaica. pág. 186.
3. Stolik Novygrad, D. (2019). Energía fotovoltaica para Cuba. Cuba. pág. 555.
4. UNESCO (2011). "Cátedra UNESCO de Sostenibilidad de la UPC y Fundación Politécnica de Catalunya. Master en Energía para el Desarrollo Sostenible. Módulo 3 - Evaluación de Recursos Energéticos Renovables." pág. 148.
5. UNESCO (2011). "Cátedra UNESCO de Sostenibilidad de la UPC y Fundación Politécnica de Catalunya. Master en Energía para el Desarrollo Sostenible. Módulo 5 - Energía Solar Fotovoltaica." pág. 215.
6. Columbié Navarro, Á. O. (2009). Actualización y perfeccionamiento de las prácticas de laboratorio de la disciplina de Circuitos Eléctricos.

Anexos.



Módulo fotovoltaico (MINI-EESF/M).



Panel solar poli-cristalino
(ES80).



Célula solar calibrada



Batería



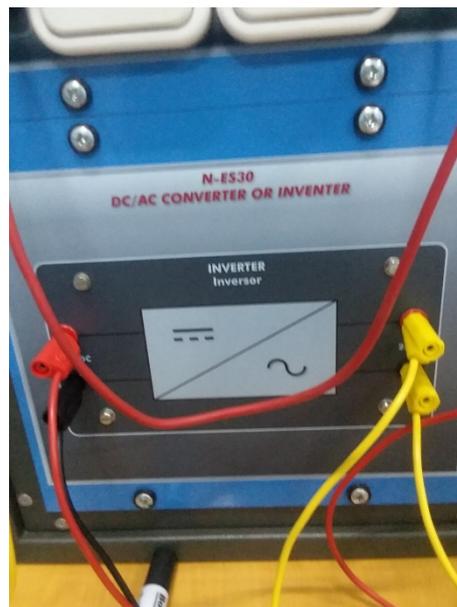
Cargador de baterías (N-ES90)



Módulo de lámparas simulan el sol



Regulador de voltaje (N-ES10).



Inversor (N-ES30).



Módulo de cargas de 230VAC(N-ES50).



12VDC (N-ES20).

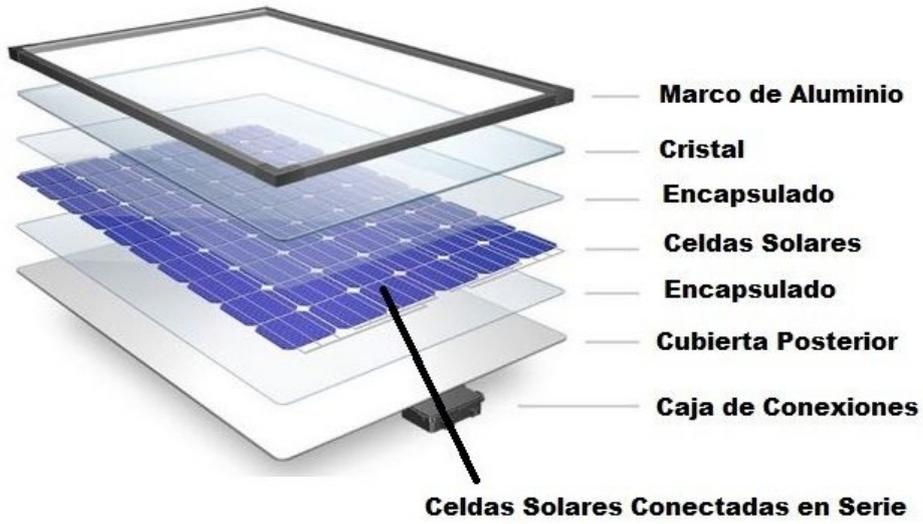


Amperímetro (N-ES40) / Voltímetro (N-ES80)

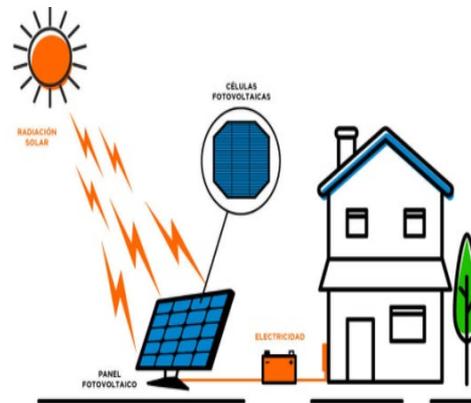
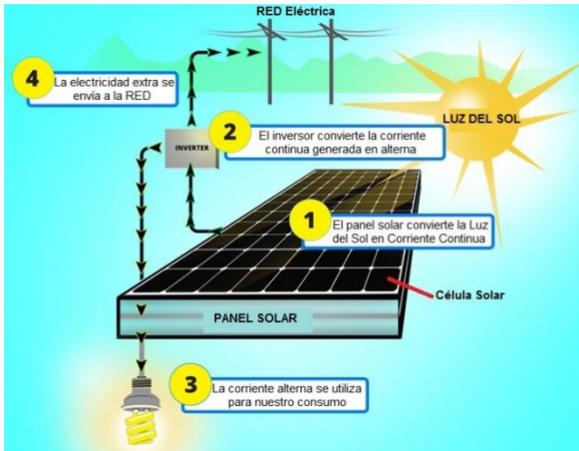


Trasador solar se uso para medir los w/m^2 radiacion solar

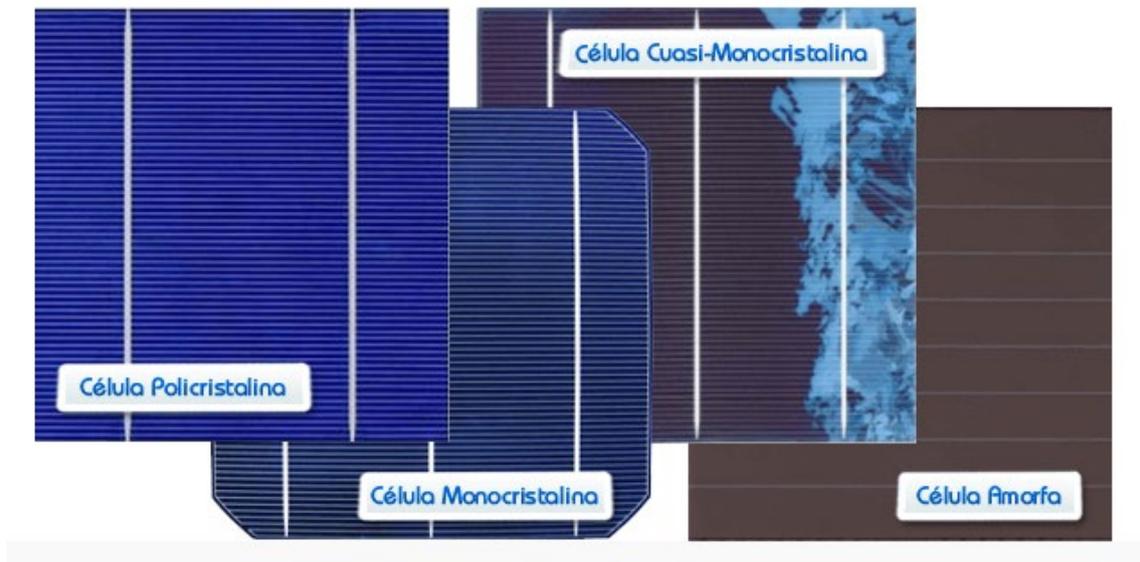
PARTES DE UN PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO



Estructura panel solar



Funcionamiento panel sola



Tipos de células fotovoltaicas